「東京電力（株）福島第一原子力発電所事故に係る個人線量の特性に関する調査」の追加調査－児童に対する個人線量の推計手法等に関する検討－
報告書

（独）放射線医学総合研究所
（独）日本原子力研究開発機構

概要

東京電力（株）福島第一原子力発電所事故に係る住民帰還に際し，個人が生活環境から受ける被ばく線量の特性を把握することは必要とされる放射線防護対策を検討する上で重要である。本研究は，内閣府原子力災害対策本部・原子力被災者生活支援チームからの依頼により，（独）放射線医学総合研究所と（独）日本原子力研究開発機構が共同で実施し，2014 年 4 月に公表した「東京電力（株）福島第一原子力発電所事故に係る個人線量の特性に関する調査」の追加調査として，課題となっていた児童を対象とした個人線量の評価に関する検討を中心に行ったものである。前報告では，福島県内で行った様々な線量測定の結果に基づき，環境放射線モニタリングにおいてこれまで一般的に用いられてきた周辺線量当量（率）と個人線量計から得られる測定値に一定の関係があることを明らかにし，この関係が個人線量計の応答の観点からは回転照射に近似できることを実験的に示した。ただし，この結果は成人男性の体格に限定して得られたものであり，体格の小さな児童では異なることが予想された。これを明らかにするため，本研究では，年齢の異なる児童の体格を模擬した人体形状ファントムを用いた回転照射実験によって，個人線量計測定値と周辺線量当量の関係における体格依存性を調べるともに，個人線量計測定値と様々な照射条件における実効線量との比較を行った。その結果，児童から成人までの幅広い年齢の個人に適用できる周辺線量当量から個人線量への換算係数を提示することができた。同時に，実験に使用した個人線量計が，体格に関係なく実効線量を適切に測定できることを確認した。加えて，前報告で挙げられた他の課題についても，関連する知見を踏まえて考察を行った。

目次

1. 背景 1
2. 目的と概要 3
3. 実験方法 5
3. 1 個人線量計 5
3. 2 ファントム 6
(1) 平板型ファントム 6
(2) 人体形状ファントム 6
3. 3 照射実験 6
4. 実験結果 8
4. 1 前実験の再現試験 8
4. 2 個人線量計応答に関する基礎データ 9
(1) 個人線量計の方向特性 9
(2) ファントムの厚さに伴う後方散乱及び減衰の変化 12
4. 3 年齢別人体形状ファントムにおける個人線量計の応答 13
(1) 前方，後方及び回転照射 13
(2) 個人線量計の設置位置の違いに伴う応答変化 14
5. 福島県内における周辺線量当量率の解析 18
6. 周辺線量当量－個人線量の年齢別換算係数 21
7. 考察 25
7.1 環境中における放射線場 25
7.2 土壌中放射性セシウムを線源とする外部被ばく線量諸量の量的関係 25
7.3 前報告で出された課題の検討 29
8. まとめ 33
参考文献等 34
別添 A 36
別添 B 39

図目次

図 1 外部被ばく線量諸量間の関係 4
図 2 体格差を考慮した個人線量評価法の構築 4
図 3 スタンド型γ線照射装置 7
図 4 平板型ファントムにおける個人線量計の設置状況 8
図 5 人体形状ファントムにおける個人線量計の設置状況 8
図 6 各ファントムの周辺線量当量に対する個人線量計測定値の比（回転照射） 9
図 7 各個人線量計のフリーエアー及びファントム設置条件での方向特性 10
図 8 個人線量計 C の設置向きによる方向特性の違い 11
図 9 ファントムの厚さに伴う個人線量計測定値の変化―ファントムによる後方散乱 12
図 10 ファントムの厚さに伴う個人線量計測定値の変化―ファントムによるγ線の減衰効果 12
図 11 人体形状ファントムの前面に設置した個人線量計 C の応答 13
図 12 年齢別人体形状ファントムにおける個人線量計 C の設置状況 14
図 13 個人線量計 C の設置状況 14
図 14 個人線量計測定値の設置位置及びファントム回転角に伴う変化 16
図 15 個人線量計測定値のファントム回転角に伴う変化 17
図 16 屋内の同一場所の高さ 50 cm 及び 1 m での周辺線量当量率の関係 18
図 17 屋外の同一場所の高さ 50 cm 及び 1 m での周辺線量当量率の関係 20
図 18 回転照射条件における年齢別ファントムの実効線量／空気カーマ比 21
図 19 回転照射条件における個人線量計測定値／周辺線量当量比 22
図 20 周辺線量当量に対する各年齢の実効線量（回転照射）または個人線量計測定値の比 23
図 21 各個人線量計のエネルギー特性（^{137}Cs の対する相対レスポンス） 23
図 22 土壌中に分布する放射性セシウムによる外部被ばく状況 25
図 23 周辺線量当量，個人線量計測定値及び実効線量の関係 26
図 24 各年齢の周辺線量当量に対する実効線量の比（左：^{134}Cs，右：^{137}Cs） 27
図 25 周辺線量当量に対する実効線量の比の重量緩衝深度による変化（^{137}Cs の場合） 28
図 26 周辺線量当量に対する各年齢の実効線量（$\beta = 2.5$ g/cm^2）または個人線量計測定値の比 29

表目次

表 1 個人線量計 A1, A2 及び C の仕様.....5
表 2 本調査で使用した人体形状ファントムの仕様（参考値）.....6
表 3 個人線量計の応答に関する再現試験の結果.....9
表 4 個人線量計の方向依存性.....11
表 5 地表からの高さ毎の周辺線量当量率の計算値.....20
表 6 回転照射条件における実効線量／周辺線量当量比.....22
表 7 回転照射条件における個人線量測定値／周辺線量当量比.....22
表 8 提案する周辺線量当量－個人線量換算係数.....24
表 9 土壌中線源（$\beta = 2.5\ g/cm^2$）における実効線量／周辺線量当量（地表高 1 m）比.....28

1. 背景

東京電力（株）福島第一原子力発電所事故の影響により，福島県内では現在でも住民の避難指示が継続されている地域がある。これらの地域は，年間の追加被ばく線量の程度に応じて，帰還困難区域，居住制限区域及び避難指示解除準備区域に区分けされており，今後の除染の進捗状況等に応じて避難指示の解除が段階的に進められる予定である。そのため，住民が生活環境から受ける被ばく線量の特性を把握することが重要であり，これに必要な調査を，内閣府原子力災害対策本部・原子力被災者生活支援チームからの依頼により，（独）放射線医学総合研究所（以下，放医研）及び（独）日本原子力研究開発機構（以下，原子力機構）は共同で行った。前報告書（2014 年 4 月公表）[1)]における主な結果は以下のとおりであった。

- 福島県内（飯舘村，田村市，川内村）での現地調査において，NaI(Tl)サーベイメータ等で測定された周辺線量当量[1]と，成人男性である調査員が装着した個人線量計から得られた測定値（個人線量計測定値）には強い相関関係が認められた。周辺線量当量に対する個人線量計測定値の比は，平均的な体格を有する調査員ではほぼ一定であり，その値は 0.7 であった。屋外に設置した個人線量計校正用ファントムに設置した個人線量計測定値からもほぼ同じ値が得られた。

- 実験室において，個人線量計校正用ファントム及び人体形状を模擬したファントムに数種類の個人線量計を設置し，^{137}Cs 線源を用いた回転照射を行った結果，周辺線量当量に対する個人線量計測定値の比は総平均値として 0.68 であり，調査員から得られた結果とほぼ一致した。このことから，現地調査が行われた山間部の多い地域の放射線場は，実験室での回転照射に近いものであることが示唆された。

- 建屋の遮へいによる線量低減率は，従前の文献値とほぼ同様な結果であり，建屋の構造材の違いにより顕著な差異が認められた。

- 調査地域で取得した周辺線量当量率のデータ，日本人の平均的な日常生活行動に関する統計データ及び上述した周辺線量当量と個人線量計測定値との関係に基づき，住民（成人）が受ける追加の外部被ばく線量を概算するための手法を検討し，代表的な生活パターンを仮定して推計した。

[1] 前報告書では空間線量率から推定される積算線量等と表記されている。空間線量率には，周辺線量当量率の他に空気吸収線量率がある。空気吸収線量は，以前レントゲンという単位で使用されていた照射線量に対応する線量である。現在の単位ではグレイであり，多くのモニタリングポストで測定される線量となっている。本報告書では空間線量（率）の定義を明確にするため，周辺線量当量（率）と表記した。

前報告において，生活環境における各場所の周辺線量当量率から個人線量（追加の外部被ばく線量）[2]を算出する方法として次式が提案された。

$$H_P = \sum_i \dot{H}^*{}_i \cdot \Delta t_i \cdot F \quad \ldots \quad (1)$$

ここで，H_P：個人線量（mSv），$\dot{H}^*{}_i$：事故以前のバックグラウンドの寄与を除く場所 i における地表高 1 m での周辺線量当量率（mSv/h），Δt_i：場所 i における滞在時間（h），F：周辺線量当量から個人線量への換算係数である。

当初，F は各場所での γ 線エネルギースペクトルの違いや個人線量計を装着する個人の体格差等の影響により，個々の条件に応じて変化するものと予測されたが，ほぼ一定の数値（0.7）と見なせることが確認された。ただし，この数値を，成人男性以外の児童を含む幅広い年齢層の個人，すなわち，体格差がある場合に適用できるかについては検討が必用である。何故なら，環境中に広く分布する放射性セシウム（^{134}Cs 及び ^{137}Cs）によって形成される放射線場で個人線量計を用いる場合は，個人線量計の装着部位である人体の前面に飛来する γ 線以外にも人体の背面から飛来する γ 線が存在し，それらが個人線量計に到達する前に人体による遮へいを受けることになるため，体格差のある成人と児童では個人線量計の応答が異なることが考えられるからである。体格の小さな児童では，成人と比較して人体による γ 線の遮へいが小さいため，前報告の結果から類推すると，児童に装着した個人線量計の応答は成人に比べてより周辺線量当量に近くなると予想される。他方，人体の前面から入射する γ 線に対しては人体が散乱体となるため，後方散乱成分による個人線量計への寄与は児童の方が成人に比べて小さくなると予想される。

本研究では，前報告で出された課題の一つである体格差が個人線量測定に与える影響を評価するため，^{137}Cs 線源を用いた回転照射条件において，年齢の異なる児童の体格を模擬した人体形状ファントムに設置した個人線量計の応答特性を調べた。この結果と環境中の様々な放射線場における実効線量を対比することにより，児童に適用可能な周辺線量当量から個人線量への換算係数を提案した。前報告で出された他の課題についても，関連する知見を踏まえて考察した。

[2] 職業被ばくの管理に用いられる個人線量計は，個人線量当量と呼ばれる量を指示するように校正がなされる。次章の解説にもあるように，個人線量当量とは国際放射線単位測定委員会（ICRU）が定める ICRU スラブファントム中の決められた深さ（強透過性放射線では 10 mm）における線量当量として定義される。ICRU スラブファントムの形状は 30 cm×30 cm×15 cm の直方体として決められているので，個人線量当量自体はこれを評価する人の体格等に本来関係のない量であるが，人体に対して前方以外から γ 線が入射する環境中では，個人線量当量を測定する個人線量計はこれを装着する人の体格等の影響を受ける。本報告（及び前報告）において周辺線量当量を基に評価を行う個人線量とは，厳密に言えば個人線量当量ではなく，個人線量当量（$H_P(10,0°)$，0°は ICRU スラブファントムの前面における法線ベクトルと入射放射線の間の角度）に対して基準校正がなされた個人線量計によって得られる測定値（または予測値）であり，これを個人が受ける追加の外部被ばく線量としてこれまで評価してきている。よって，この個人線量が防護量である実効線量の指標として適切であるかが重要であり，本研究では人体形状ファントムを用いた実験と実効線量に関する理論計算の結果を基に検討した。

2. 目的と概要

本研究の目的と概要を述べる前に，図 1 に示す外部被ばく線量に関連する諸量 [2] について簡単に補足する。詳細な情報が必要であれば，他の解説等を参照されたい [3-6]。

外部被ばく線量を評価する量には防護量と実用量があり，これらは物理量であるフルエンスや自由空気中の空気カーマ等の物理量から導出される。防護量とは人の放射線防護を目的とした量であり，その代表的なものは実効線量である。防護量の実測は原理的に不可能であり，人体組織を模擬した数学（数値）ファントムに基づく計算によって得られる。福島県が実施している県民健康管理調査において，個人の行動記録を基に推計されている福島県民の外部被ばく線量は実効線量である [7]。他方，実用量は，実測が困難な防護量に関連付けられた測定可能な量として定義された量であり，本調査での議論の主体になる周辺線量当量と個人線量当量は，それぞれ場のモニタリングと人のモニタリングのために導入された実用量である。どちらも，国際放射線単位・測定委員会（ICRU）が定めた組織等価物質（密度 1 g/cm^3，元素組成は重量%で酸素：76.2%，炭素 11.1%，水素 10.1%，窒素 2.6%）中の決められた深さにおける線量当量として定義される点は共通しているが，レセプタとして，周辺線量当量は ICRU 球（ICRU 組織等価物質でできた直径 30 cm の球），個人線量当量は ICRU スラブファントム（ICRU 組織等価物質でできた 30 cm×30 cm×15 cm）が使われる点が異なる。周辺線量当量はこれを評価する放射線場が拡張，整列場であることを前提としている。拡張・整列場とは，場の状態が着目する体積全体にわたり基準点と同じ（拡張），かつ，フルエンスが単一方向（整列）である仮想的な放射線場のことである。これは，入射方向に依存しない等方的な検出感度を有する測定器を用いて空間のある一点の周辺線量当量を測定し，この結果を評価対象とする領域全体の代表値と見なすことと同義である。環境モニタリングで多く利用されている NaI(Tl)サーベイメータは周辺線量当量率測定器であり，ほぼ等方的と見なせる方向特性を有している [8]。これに対し，個人線量当量は，実際の放射線場における人体組織中の線量当量であり，レセプタである ICRU スラブファントムの形状からも分かるように，個人線量当量には放射線の入射方向に対する依存性がある。職業被ばく状況では線源が人体の前方にあることが大半であるため，個人線量計の校正は前方照射条件が基本とされている [3]。一方，地表付近に広く線源が一様に分布する環境中で個人線量当量を測定する場合には，人体の前面以外に側面や背面から放射線が入射する状況も考慮する必要がある。その際，レセプタとしての人体の体幹部の大きさや形状にも言及する必要がある。

本研究の主な目的は，前報告で出された課題の一つである体格差が個人線量測定に与える影響を評価するとともに，前報告で提案された周辺線量当量から個人線量への換算係数を，児童を含む幅広い年齢の個人に適用可能とするための数値を決定することである。そのため，(1)式中の換算係数 F の体格依存性を考慮した $F(age)$を新たに定義した。

$$H_P = \sum_i \dot{H}^*{}_i \cdot \Delta t_i \cdot F(\mathrm{age}) \quad \ldots \quad (2)$$

[3] 個人線量当量の入射角度依存性に関するデータ（$H_P(10,\alpha)$と$H_P(0.07,\alpha)$，αは入射角）は，ICRP Publication 74 [2] の表 24 及び表 25 に与えられている。ただし，α は $0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°$に限定されている。

*F(age)*は，後述する年齢の異なる児童の体格を模擬した人体形状ファントムに設置した個人線量計の応答特性や環境中における様々な放射線場における周辺線量当量と実効線量の量的関係等を考慮して決定した。また，児童が個人線量計を装着したときに考慮すべき周辺線量当量率の高さ方向の違いについて，公開情報に基づき解析した。なお，本研究では，前報告で行った様な福島県内での現地測定は実施せず，放医研が所有する照射装置を用いた実験室での試験を主体とした。これは，前報告において，線源を用いた回転照射条件が現地の代表的と考えらえる放射線場を近似できることを確認したためである。図 2 に本研究の概要を示す。

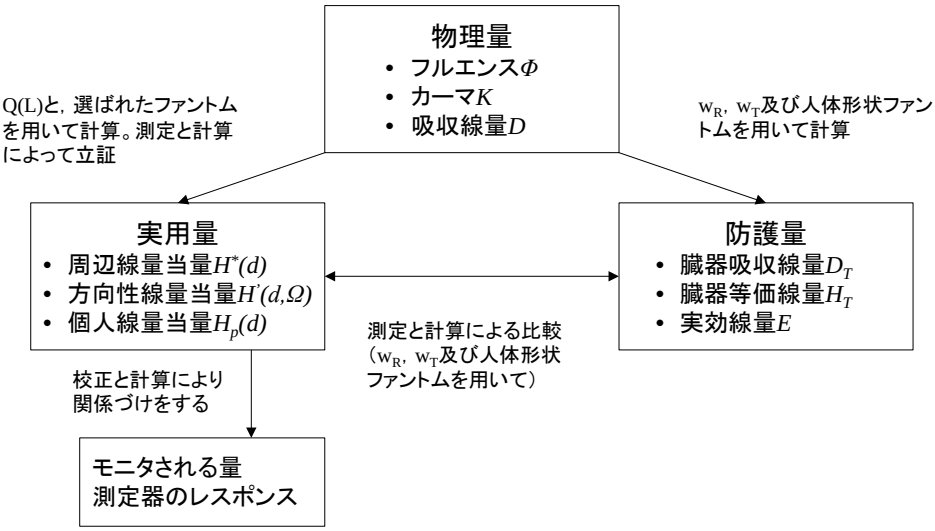

図 1 外部被ばく線量諸量間の関係 [2)]

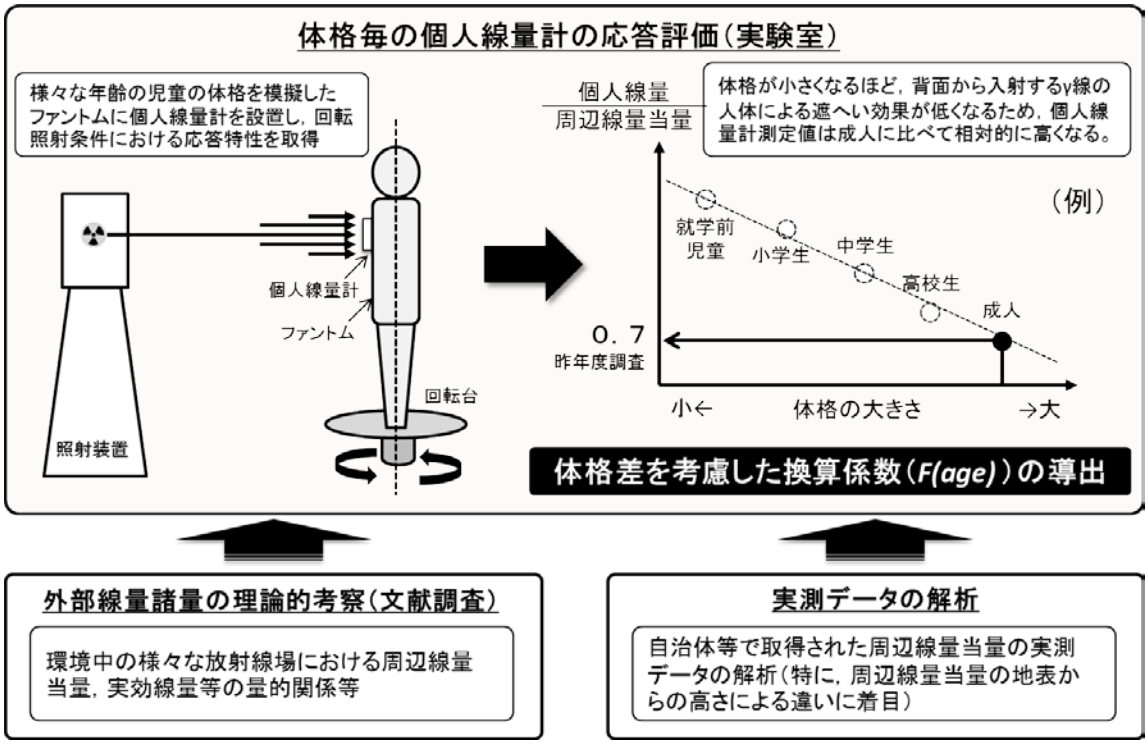

図 2 体格差を考慮した個人線量評価法の構築

3. 実験方法

3.1 個人線量計

本研究では，以下の 3 種類の市販の個人線量計を使用した。各個人線量計の表記は前報告書と同じである。

- 個人線量計 A1（A 社）
  ※ 同製品は携帯型周辺線量当量率計として開発されたものだが，個人線量当量測定用に校正されたものを使用した。
- 個人線量計 A2（A 社）
- 個人線量計 C （C 社）

いずれも，シリコン半導体検出素子を内蔵する電子式線量計であり，その都度，積算線量の読み取りが容易である。各個人線量計の主な仕様を表 1 に示す。なお，本研究では，福島県内での使用実績が多い個人線量計 C を中心に実験を行った。実験に使用した個人線量計の測定値のばらつきは平板型ファントム上に設置した前方照射条件において，同一機種間で約 2%以内（1σ）であった。

表 1 個人線量計 A1, A2 及び C の仕様

機　　種	A1	A2	C
測定線種	γ 線及び X 線	γ 線及び X 線	γ 線
検出部	シリコン半導体検出器	シリコン半導体検出器	シリコン半導体検出器*
測定範囲	積算線量 ≤ 99.99 mSv 線量率 ≤ 999.9 μSv/h	0.001 mSv ~ 999.9 mSv 0.001 mSv/h ~ 999.9 mSv/h	0.1 μSv/h ~ 99.9999 mSv
測定精度	積算線量 ≤ ±10% 線量率 ≤ ±15%	指示誤差 ≤ ±10% 線量当量率直線性 ≤ ±10%	線量当量率直線性 ≤ ±10% (2 μSv/h 以上：^{137}Cs)
測定ｴﾈﾙｷﾞｰ範囲	60 keV ~ 1.5 MeV	35 keV ~ 3 MeV	約 50 keV < *
エネルギー依存性	≤ ±30%（上記エネルギー範囲：^{137}Cs 基準）	≤ ±20%（60 keV~1.5 MeV, ^{137}Cs 基準，ファントム付）	≤±30% (^{60}Co の γ 線)*
方向特性	≤ ±25%（垂直±180°, 水平 -60°~ ＋240°：^{137}Cs 基準）	≤ ±15% （水平垂直 ±60°）*	≤ ±30% （水平垂直 ±60°）*
使用温度	-10℃～40℃	-10℃～40℃	
使用湿度	≤ 95%（生活防水）	≤ 90%（結露なし）	
寸法	120 (W)×46 (H)×15 (D) mm	30 (W)×110 (H)×12 (D) mm	32 (W)×68 (H)×14 (D) mm
質量	約 110g	約 60g	約 23g
規格	JIS Z4333(2006)に準拠		エネルギー依存性及び方向特性は JIZ Z4312 を満たす。

* 前報告書 [1] から引用。他の情報はメーカ取扱説明書等から引用。

3. 2 ファントム

(1) 平板型ファントム

前報告で原子力機構が実施した照射実験との比較のため，JIZ Z4331[9]に規定される P-30 型（30 cm×30 cm×15 cm のメタクリル樹脂板）に準拠した平板型ファントムを使用した。この平版型ファントムは，30cm×30 cm×5 cm のメタクリル樹脂板 3 枚で構成されており，P-30 型とは構造の違いはあるが，P-30 型と放射線特性上の差異は無いと考えて良い。その他，入射γ線の後方散乱成分のファントムの厚さによる変化を評価するため，厚さ 1 cm のメタクリル樹脂板を複数使用した。

(2) 人体形状ファントム

年齢の異なる児童（乳幼児を含む）体格を模擬した人体形状ファントムとして，本調査では米国 CIRS 社製ファントム（CIRS ATOM® phantom，CIRS Inc., US）[10]の内，0 歳児，1 歳児，5 歳及び 10 歳児に相当するものを使用した。その他，前調査で使われた RANDO ファントム（RANDO® phantom, The phantom laboratory, US）[11]を使用した。CIRS 社製ファントムは医療被ばく線量評価を目的に開発されたものであり，人体の主要な組織と等価な材質で作られている。また，国際放射線防護委員会（ICRP）が提示した年齢別の標準体格にも準拠しており，本調査の目的にも合致している。表 2 に使用した人体形状ファントムの体格に関する参考値等を示す。

表 2 本調査で使用した人体形状ファントムの仕様（参考値）

体格	身長（cm）	体重（kg）	胸部面積（cm）	製造者
0 歳児	51	3.5	9×10.5	CIRS Inc. [*1]
1 歳児	75	10	12×14	CIRS Inc. [*1]
5 歳児	110	19	14×17	CIRS Inc. [*1]
10 歳児	140	32	17×20	CIRS Inc. [*1]
成人	175	73.5	－	The phantom lab. [*2]

[*1] CIRS Inc., http://www.cirsinc.com/products/modality/33/atom-dosimetry-verification-phantoms/
[*2] The phantom laboratory, http://www.phantomlab.com/products/rando.php

3. 3 照射実験

本研究では，放医研で所有するスタンド型γ線照射装置を使用し，各ファントムに設置した個人線量計の応答を調べた。図 3 にスタンド型γ線照射装置の外観を示す。同装置には ^{137}Cs 線源（3.7 TBq, 1974 年 11 月付）が内蔵されている[12]。

平板型ファントムは，線源から個人線量計の設置面までの距離が 5 m になる位置に配置し，照射実験を行った。人体形状ファントムについては，線源から体幹部厚さ（前面－背面）中心までの距離が 5 m となる位置で行うことを基本条件として照射実験を行った。線源から 5 m 離れた位置での周辺線量当量率は，^{137}Cs 線源の照射時に 3.9 ± 0.1 mSv/h であり，本実験での照射視野の範囲内でほぼ一様であった。1 回の照射時間は 10 分間または 20 分間とした。また，各個人線量計の方向特性は 30 度刻みで取得し，また回転照射を行うときは照射時間中に 40 回転以上となるようにファントムを設置するターンテーブルの回転数を決定した。

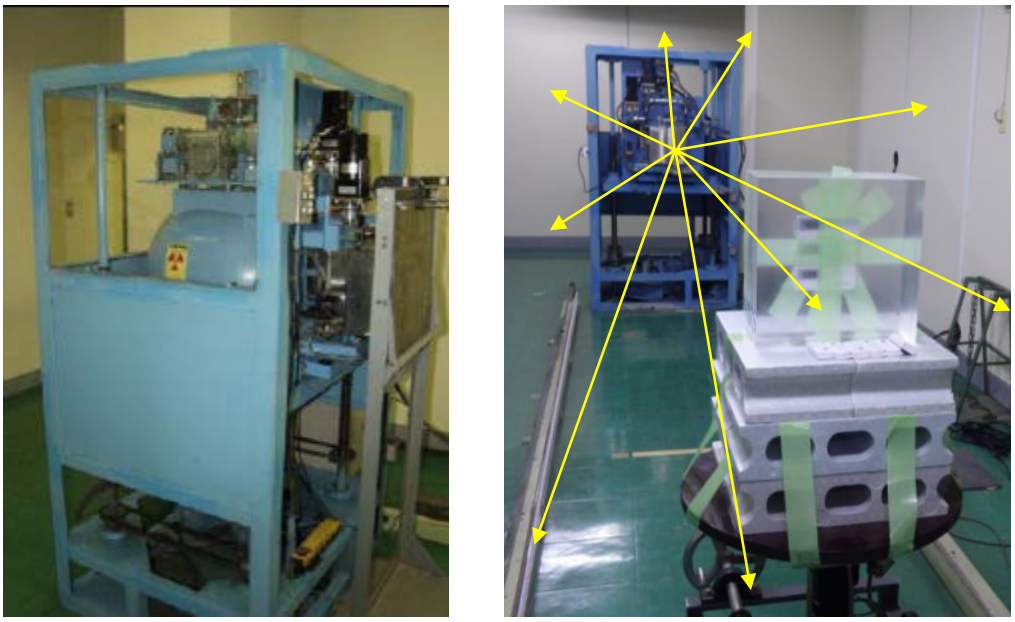

図 3 スタンド型γ線照射装置

4. 実験結果

4. 1 前実験の再現試験

本実験を行った照射施設は前回のものと異なり，実験室の違いによる個人線量計の応答特性の差異を確認する必要があるため，同様な照射条件において個人線量計の応答に関する再現試験を行った。この試験では，図 4 及び図 5 に示すように，3 種類の個人線量計を平板型ファントム及び人体形状ファントム（成人）の前面中央部に複数設置し，前方，後方及び回転照射条件での個人線量計測定値を取得した。図 6 には，3 種類の個人線量計の周辺線量当量（＝周辺線量当量率×照射時間）に対する個人線量計測定値の比を前実験の結果と比較して示した。再現試験の結果は表 3 にも示したが，今回と前回の実験の差異は，平板型ファントムでは 2%程度，人体形状ファントムでは 3%～11%（個人線量計 C の後方照射／前方照射の結果を除く）であった。個人線量計の設置位置の範囲が限定される平板型ファントムでは，3 種類の個人線量計の測定値は前実験の結果と良く一致しており，この結果から実験の再現性が確保されていると判断できる。人体形状ファントムについては，個人線量計の設置位置の違いによる応答の変化が考えられたことから，本研究ではこの点にも着目して実験を行った [4]。

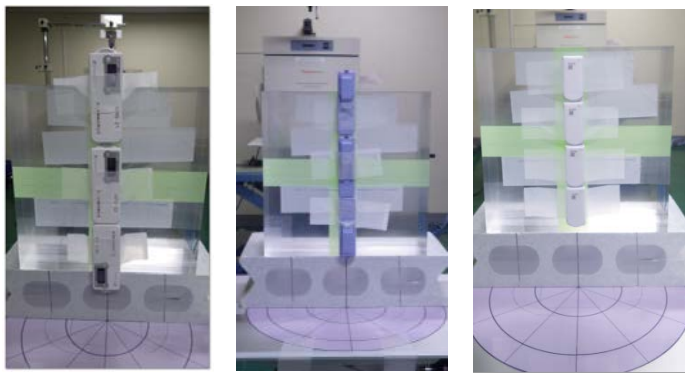

図 4 平板型ファントムにおける個人線量計の設置状況
（左：個人線量計 A1，中央：個人線量計 A2，右：個人線量計 C）

図 5 人体形状ファントムにおける個人線量計の設置状況
（左：個人線量計 A1，中央：個人線量計 A2，右：個人線量計 C）

[4] 前実験では，個人線量計は成人ファントムの前面－背面距離が最も厚くなる胸部中央のみに設置した。

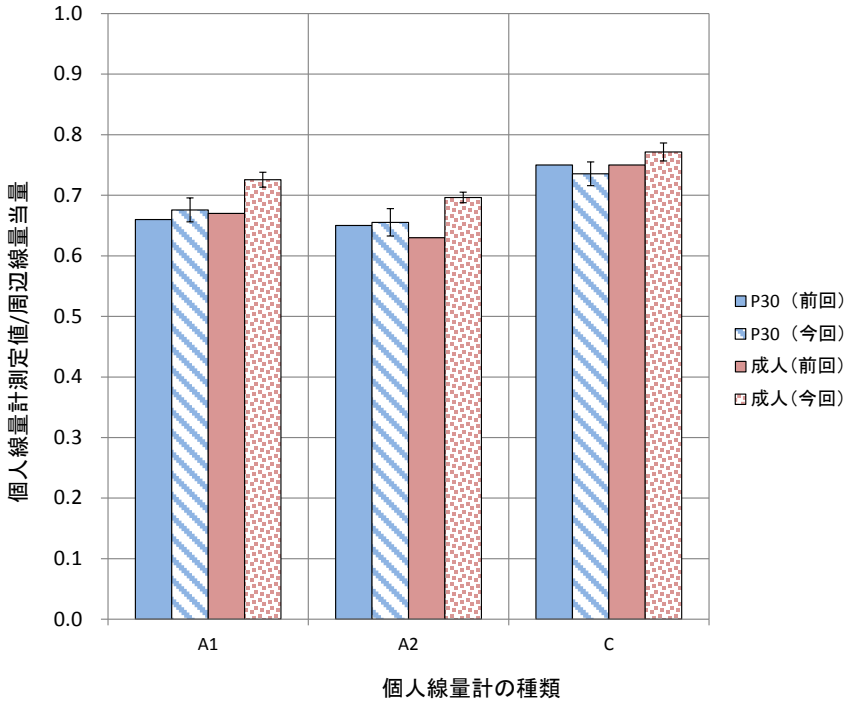

図 6 各ファントムの周辺線量当量に対する個人線量計測定値の比（回転照射）

表 3 個人線量計の応答に関する再現試験の結果

照射条件	個人線量計	平板型ファントム（P30）		人体形状ファントム（RANDO）	
		前回	今回	前回	今回
後方照射/前方照射	A1	0.46	0.44	0.33	0.34
	A2	0.36	0.35	0.27	0.27
	C	0.41	0.40	0.27	0.38
回転照射 （周辺線量当量比）	A1	0.66	0.68	0.67	0.73
	A2	0.65	0.66	0.63	0.70
	C	0.75	0.74	0.75	0.77

4. 2 個人線量計応答に関する基礎データ

(1) 個人線量計の方向特性

個人線量計の基礎特性の一つである入射γ線に対する方向特性について，個人線量計 A2 及び C の方向特性をγ線の入射角 30 度刻みで取得した（個人線量計前面と線源が正対した場合を 0 度し，右回りに入射角が増加）。その結果を図 7 及び表 4 に示す。同図において，フリーエアーとあるのはγ線の散乱，減衰等の影響が無視できる発砲スチール板に，ファントム設置とあるのは 3.2 で述べた平板型ファントムに，個人線量計を設置して得られたデータであることを意味する。

図 7 に示すように，フリーエアーでの照射条件でも個人線量計には方向特性がある。個人線量計 A2 では，180 度での測定値は 0 度のときと比べて約 20%低下する。個人線量計 C では，270 度で測定値が大きく減少する。これは照射場の実験系や各個人線量計の内部構造等による影響と考えられるが特に個人線量計 C の特性は，内蔵電池による遮へいのためである。

一方，個人線量計を線源からみてファントムの前面に設置した場合，個人線量計測定値はフリーエアーの場合と比較して上昇し，背面にある場合は低下する。これは，ファントムによるγ線の後方散乱と減衰のためである。測定値が最も減少するのは，線源と個人線量計を結ぶ直線上においてγ線がファントムを横切る距離が最大となる 120～150 度または 210～240 度のときであった。0 度から 330 度の平均値で見ると，ファントムに設置した個人線量計の測定値の低下は 2 種類の個人線量計ともに約 20%であった。通常，個人線量計の校正は，個人線量計をファントムに設置して前方照射した際に得られるレスポンスを，空気カーマ等から決定する個人線量当量（$H_P(10,0°)$）と比較して行う[13]。この条件では，個人線量当量は周辺線量当量（$H^*(10,0°)$）にほぼ等しくなるため，^{137}Cs を基準照射として校正された個人線量計の測定値も同様の関係となる。個人線量計 A2 は，ファントムに設置した前方照射条件における測定値が周辺線量当量とほぼ一致しているが，個人線量計 C では測定値が周辺線量当量に比べて若干過大となる（表 4）。また，前述した個人線量計 C の方向特性における内蔵電池の影響は，図 8 に示すように個人線量計の設置方向の違いにより変化するものの，全方向の平均で見れば縦置と横置での測定値の差異は 2%以内であった（ファントムに設置時）。したがって，回転照射場に近い環境では，個人線量計 C の設置方向の違いによる差異は測定値に殆ど影響しないと考えられる。個人線量計の種類に限らず，通常の生活の中で個人線量計が使用されることを考慮すると，個人線量計の種類によってはその装着条件を厳格に定めることは難しい[5]。そのため，福島県内での運用を考える場合，後述する個人線量計の装着位置も含めて，様々な条件における個人線量計の応答特性を取得することが重要である。

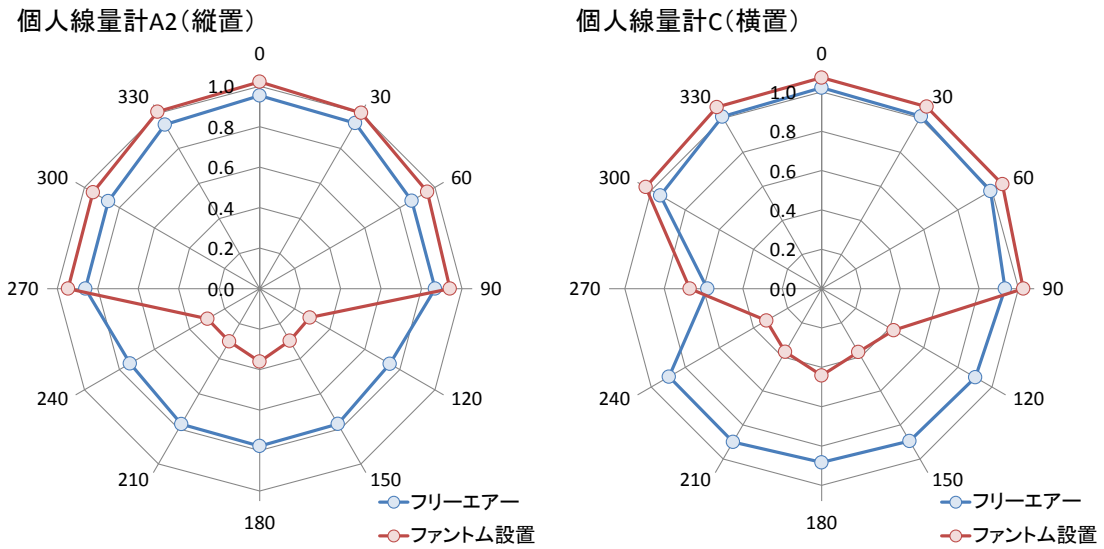

図 7 各個人線量計のフリーエアー及びファントム設置条件での方向特性

（周辺線量当量で規格化した個人線量計測定値）

[5] 個人線量計 C は，裏面にクリップが無い為に専用の首掛けホルダーに入れて使用する（児童の場合はランドセルに入れて使用するのも可）ことが取扱説明書に記載されている。このことから，個人線量計 C では，装着時の個人線量計の向きを厳密に規定していないものと思われる。他方，個人線量計 A2 は裏面にクリップがあり，装着する際は自ずと縦置になる。

表 4 個人線量計の方向依存性

（周辺線量当量で規格化した個人線量計測定値）

角度（度）	個人線量計 A2		個人線量計 C		
	フリーエアー（縦置）	ファントム設置（縦置）	フリーエアー（横置）	ファントム設置（横置）	ファントム設置（縦置）
0	0.95	1.02	1.02	1.07	1.06
30	0.94	1.00	1.01	1.07	1.05
60	0.87	0.96	0.99	1.06	1.02
90	0.87	0.94	0.93	1.02	0.91
120	0.74	0.29	0.90	0.42	0.33
150	0.77	0.30	0.89	0.37	0.36
180	0.78	0.36	0.88	0.44	0.43
210	0.77	0.30	0.90	0.37	0.36
240	0.74	0.30	0.90	0.32	0.39
270	0.86	0.95	0.58	0.67	1.05
300	0.86	0.95	0.95	1.03	1.07
330	0.94	1.01	1.01	1.06	1.06
平均	0.84	0.70	0.91	0.74	0.76

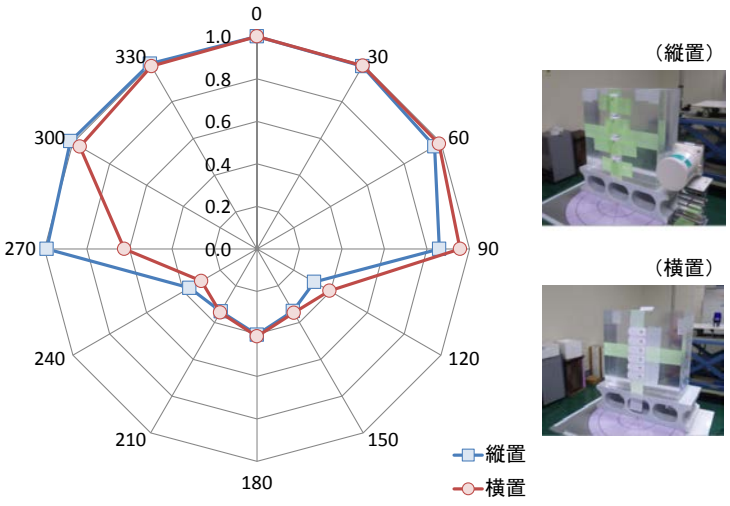

図 8 個人線量計 C の設置向きによる方向特性の違い

（入射角 0 度の測定値で規格化した個人線量計測定値）

(2) ファントムの厚さに伴う後方散乱及び減衰の変化

ファントムの厚さに伴う個人線量計へのγ線の後方散乱成分や減衰の効果に関する基礎データの取得のため，図 9 や図 10 に示した照射条件において実験を行った。同図に示す様に，線源と個人線量計との間の距離は一定に保ちながら，個人線量計の背面または前面に設置した平板型ファントムの厚さを変更した。

図 9 のグラフは，前方照射の際の個人線量計測定値のファントムの厚さによる変化を示している。同図から散乱体となるファントムの厚さが増すにつれて測定値が増加する傾向があるが，ファントムの厚さが 10cm を超えるとほぼ一定になる。また，図 10 には後方照射の際の個人線量計測定値のファントムの厚さによる変化を示しているが，ファントムによる入射γ線の減衰によって，個人線量計の校正に用いられる厚さ 15cm のファントムに設置した個人線量計測定値はフリーエアー条件（個人線量計も後方照射条件）の場合に比べて約半分になる。

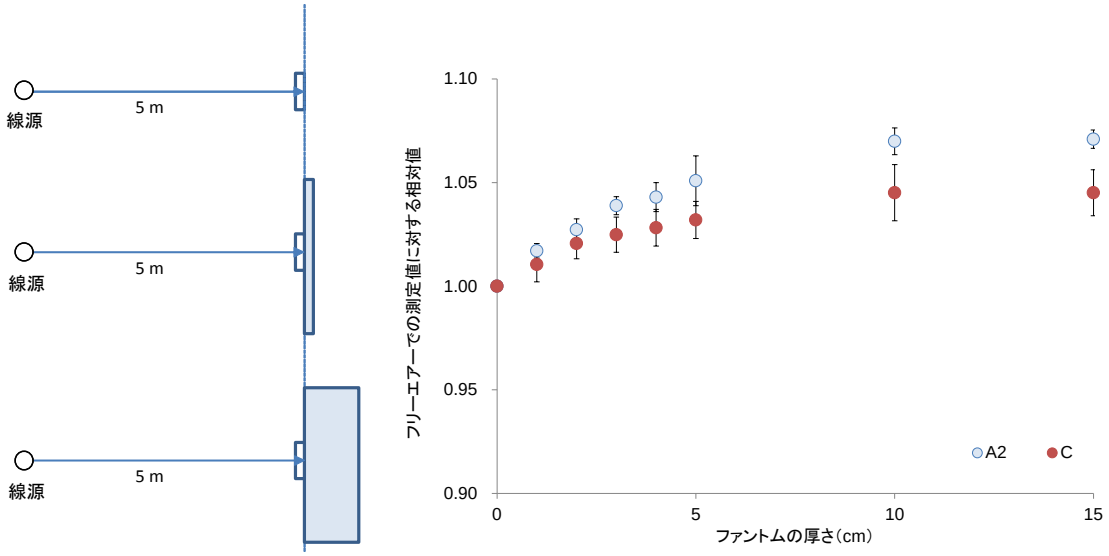

図 9 ファントムの厚さに伴う個人線量計測定値の変化―ファントムによる後方散乱

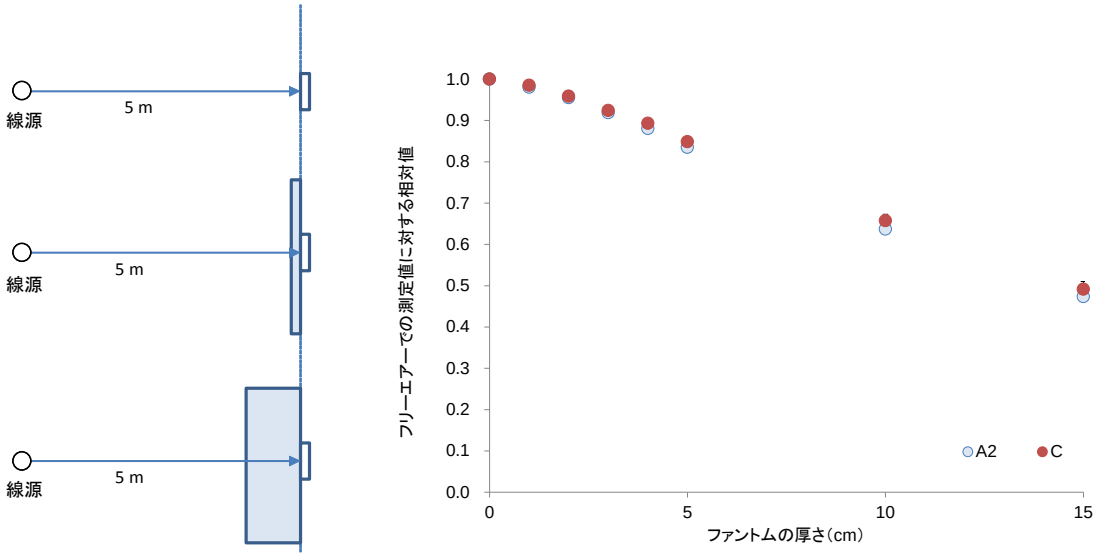

図 10 ファントムの厚さに伴う個人線量計測定値の変化―ファントムによるγ線の減衰効果

4. 3 年齢別人体形状ファントムにおける個人線量計の応答

(1) 前方，後方及び回転照射

個人線量計 C を 3.2 項で述べた年齢別人体形状ファントムの前面中央部に 3 個から 5 個設置し，前方，後方及び回転照射したときの周辺線量当量に対する個人線量計測定値の比を図 11 に示す。照射時のファントム体幹部（前面－背面）中心から線源までの距離は前述のとおり 5 m に合せ，回転照射時にはこの中心に対してファントムを回転させた。結果は次のとおりである。前方照射条件では，周辺線量当量に対する個人線量計測定値の比は 1 よりも若干大きく，その傾向は年齢が下がるにつれて僅かに減少する傾向が見られた。これは，個人線量計を設置したファントム体幹部の厚さが小児を模擬したファントムではうすいために後方散乱成分が少なくなったためと考えられる。後方照射条件では，ファントムの違いによる個人線量計測定値の差異が明確に現れ，ファントム体幹部の厚さ（前面－背面）の違いを反映し，0 歳児ファントムと成人ファントムでは約 80%の差異があった。また，各ファントムに設置した個人線量計間の測定値のばらつき（図 11 中に示す誤差棒）は他の照射条件に比べて大きくなるが，これは個人線量計の設置位置におけるファントム厚さが一定ではないことを反映した結果と考えられる。回転照射条件では，個人線量計測定値は前方照射条件と後方照射条件の結果の中間となる。ただし，各ファントムでの個人線量計測定値の差異は約 10%以内に収まり，後方照射条件のそれと比較して小さくなる。個人線量計間の測定値のばらつきも，後方照射条件と比較して減少する結果となった。比較のため，図 11 には平板型ファントムの結果も併せて示した。平板型ファントムに設置した個人線量計 C の応答は，後方照射条件で見ると 10 歳児，回転照射条件で見ると成人をそれぞれ模擬した人体形状ファントムに近い結果となった。図 12 には，個人線量計 C の各年齢別人体形状ファントムへの設置状況を示した。

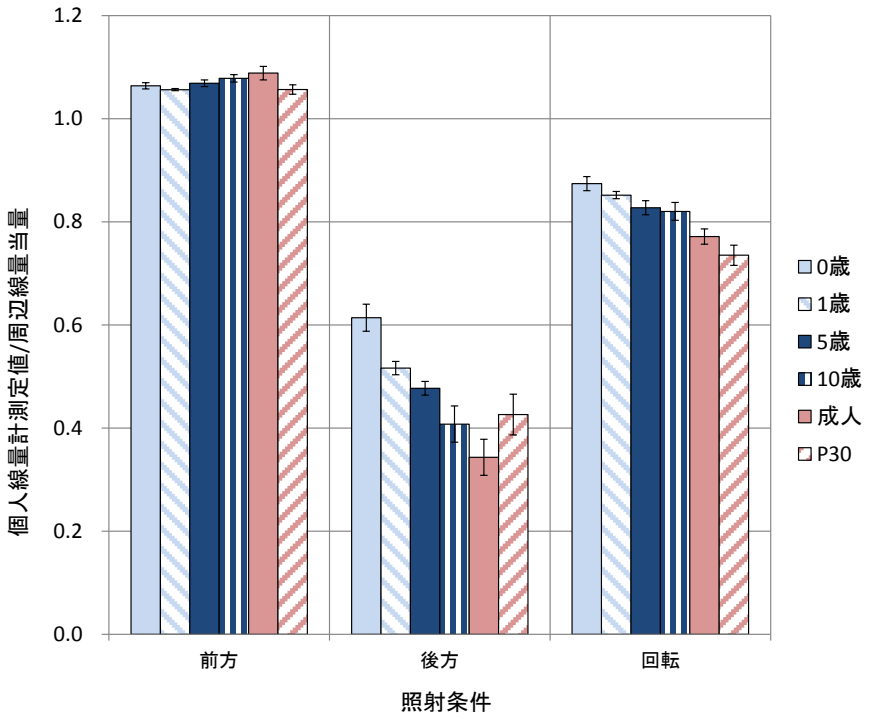

図 11 人体形状ファントムの前面に設置した個人線量計 C の応答

図 12 年齢別人体形状ファントムにおける個人線量計 C の設置状況

（左から，0 歳児，1 歳児，5 歳児，10 歳児及び成人を模擬したファントム）

(2) 個人線量計の設置位置の違いに伴う応答変化

個人線量計の設置位置の違いによる応答の変化を調べるため, 個人線量計 C を図 13 に示すように人体形状ファントムの体幹部前面の中央，左側，右側の各列に設置し，線源方向に対向するファントムの回転角を 30 度刻みで変えながら照射を行った。なお，個人線量計を設置する各列の間隔（個人線量計 C の中心を各列上に合せて設置）は，各年齢別人体形状ファントム及び個人線量計 C の大きさを考慮して，1 歳児，5 歳児，10 歳児及び成人のファントムについて，それぞれ，3.5 cm，4 cm，5 cm 及び 7 cm とした。0 歳児のファントムについては，個人線量計を設置可能な範囲が限られるため，中央列のみに個人線量計を設置した。また，個人線量計の設置数は，0 歳児，1 歳児，5 歳児，10 歳児及び成人のファントムについて，それぞれ，3 個，3 個，4 個，5 個及び 6 個として，体幹部の高さ方向の範囲を概ね含むように個人線量計を配置した。

図 13 個人線量計 C の設置状況

（成人ファントム）

結果の一例を図 14 に示す。同図では，成人及び 5 歳児のファントムに設置した個人線量計の測定値を, ファントムの回転角が 0 度（線源に対してファントム正面が正対する角度であり，右回り方向に角度が増加）のときの測定値に対する相対値として，個人線量計をファントム体幹部の中央，左側，右側の各列に設置したときの結果を示している。また，同図中に表記した線量計の番号は, 頸部側から下腹部側に向かって付番している。この結果から示されるように，個人線量計の設置位置による応答の変化は，ファントムが線源に対して背面となる状況下で増加する傾向がある。これは，ファントムの後方から入射する γ 線について，個人線量計に到達するまでに通過するファントム中の距離や組織が，個人線量計の設置位置によって変化するためである。背面照射（180 度）の場合，ファントムの上部に設置した個人線量計の測定値が下部に設置したものよりも高くなる現象が時折見られるのは，ファントム体幹部の上部に含まれる肺組織によるものと考えられる。図 15 には，個人線量計の設置位置各列（中央，左側及び右側）における個人線量計測定値の平均を求め, これらを比較した結果を示した（0 歳児以外）。同図には，全設置場所に対する個人線量計測定値の平均値とその標準偏差も表示した。この結果から分かるように，各列間の測定値の差異は，ファントムの回転度が 120 度及び 240 度で最大となる。ただし，左右列に設置した個人線量計の測定値は，回転角 180 度に対してほぼ対称であり，全回転角で平均すれば各列での個人線量計測定値の差異は数%以内であった。また，個人線量計測定値の回転角平均は, 回転照射条件での個人線量計測定値にほぼ一致した。なお，本章で示した実験データについては，この本報告書の別添 A にも掲載した。

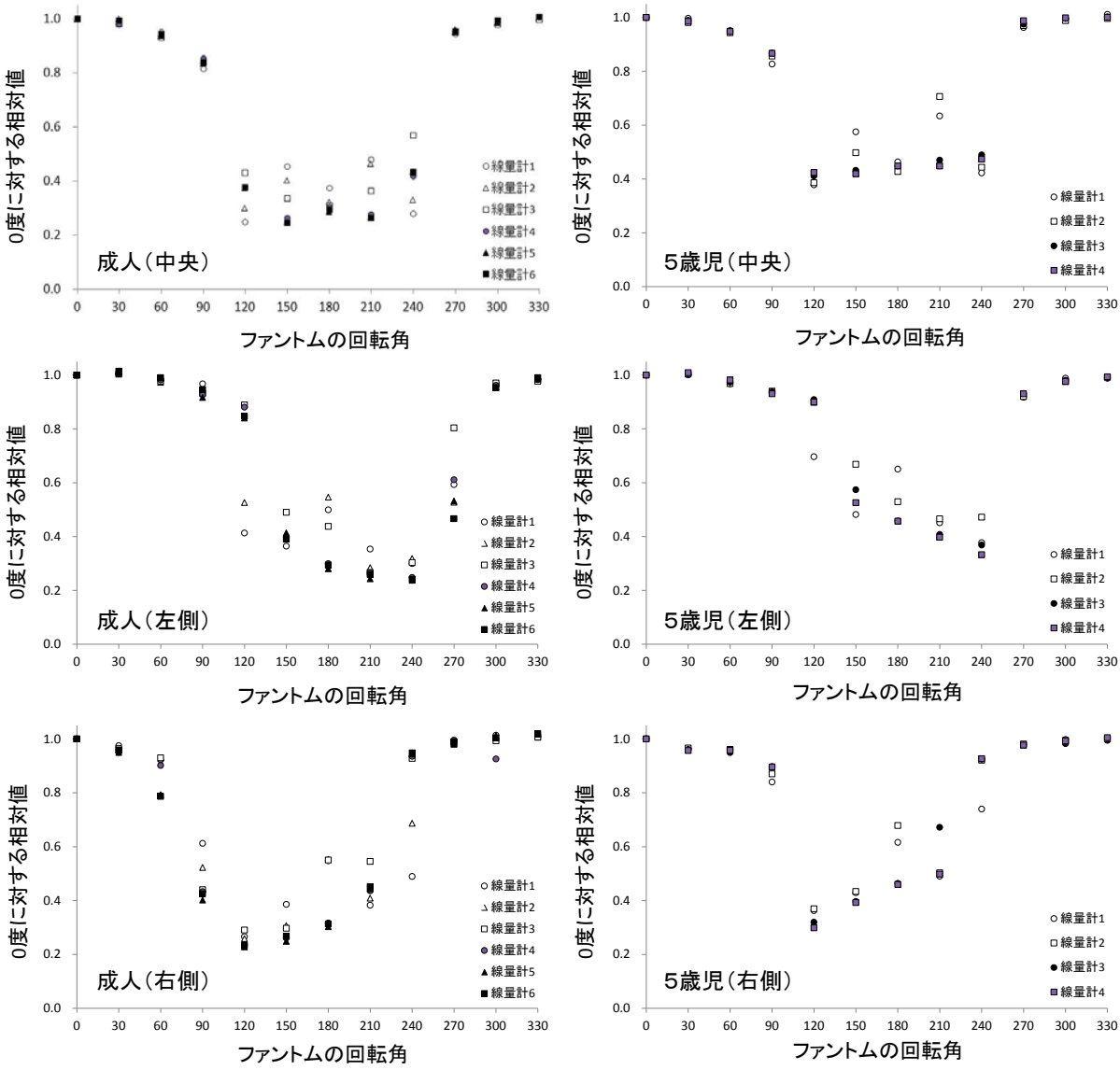

図 14 個人線量計測定値の設置位置及びファントム回転角に伴う変化

（左：成人ファントム，右：5 歳児ファントム）

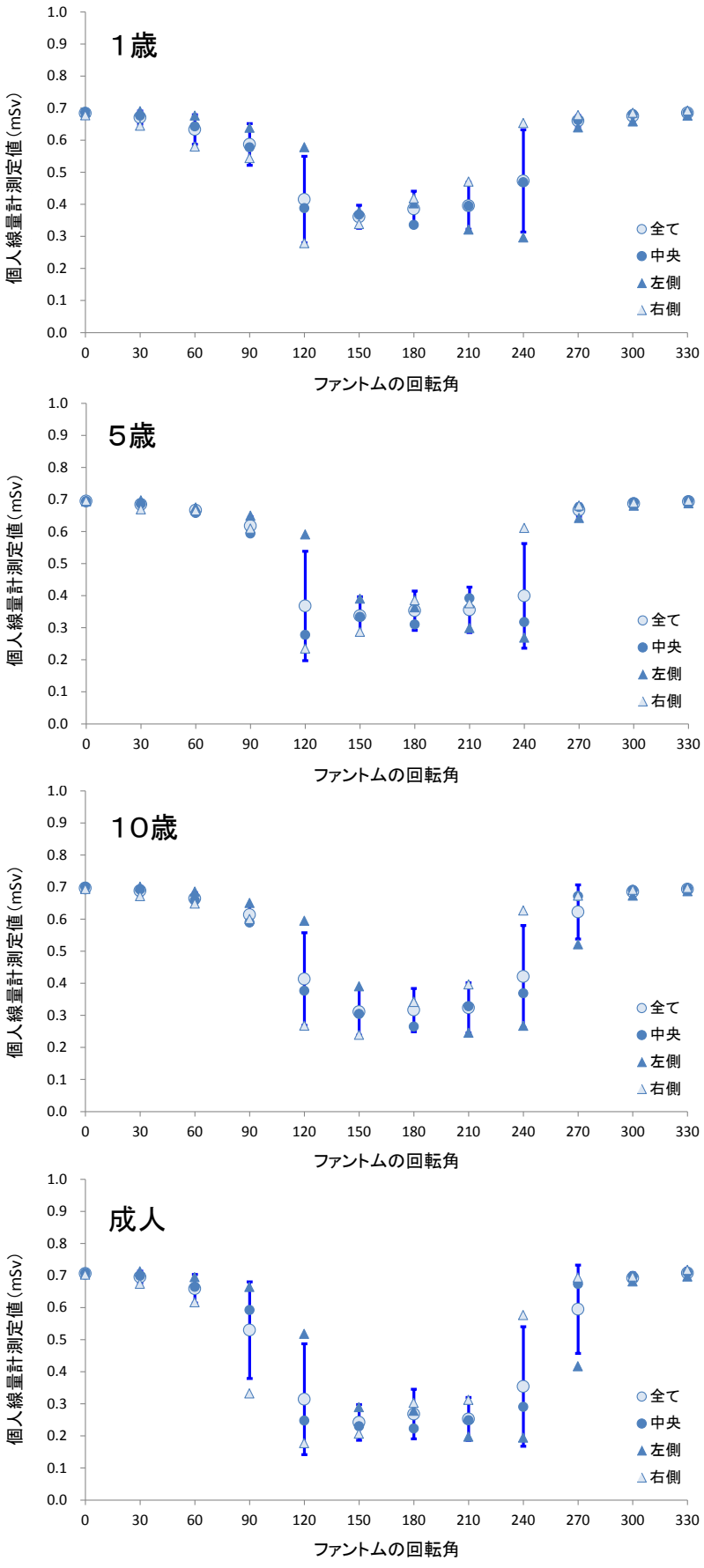

図 15 個人線量計測定値のファントム回転角に伴う変化

5. 福島県内における周辺線量当量率の解析

前報告において導出した周辺線量当量と個人線量（追加の外部被ばく線量）との関係は，前者は地表から 1 m の高さで測定された数値，後者は成人男性である調査員の胸部付近に装着した個人線量計から実測された数値に基づく。この場合，個人線量計の装着位置の地表からの高さも大体 1 m 前後となるが，児童の場合（特に就学前）にはそれよりも低くなることが予想される。よって，上記と同様な関係を用いて児童の個人線量を評価する場合，児童が装着する個人線量計の位置に近い高さで測定された周辺線量当量を使うことも考えられる。実際，学校や公園等の児童が中心となる生活環境では，地表から 50 cm の高さでも周辺線量当量率が測定されている [14]。一方，その他の生活環境で取得されている周辺線量当量率や航空機モニタリングで得られる周辺線量当量率マップなどの他の多くのデータは，高さ 1 m に対するものである。本章では，児童の個人線量を推定する際に用いる周辺線量当量率として，どの高さで測定されたものを用いるべきかを，屋内外で取得された実測データの解析に基づき検討した。

前報告で行った福島県内（飯舘村，田村市，川内村）での現地調査において，下記の建屋内の同一場所の高さ 50 cm 及び 1 m の周辺線量当量率の関係は図 16 に示すとおりであった。

- 一般家屋内：飯舘村（2 件 9 地点），川内村（2 件 7 地点）
- 学校建屋内：飯舘村（1 校舎 5 地点），田村市（1 校舎 8 地点），川内村（1 校舎 3 地点）
- 集会場内：飯舘村（1 件 1 地点），田村市（2 件 3 地点），川内村（1 件 1 地点）

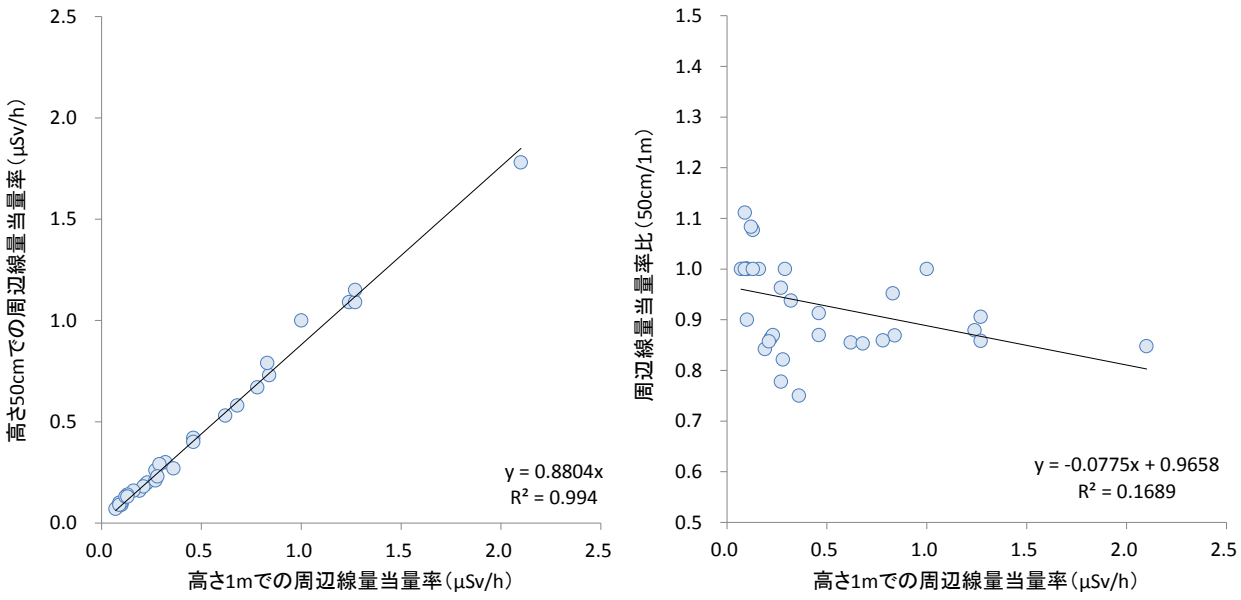

図 16 屋内の同一場所の高さ 50 cm 及び 1 m での周辺線量当量率の関係

図 16 に示すように，二つの高さでの周辺線量当量率の間には高い相関が見られ，最小二乗法により求めた周辺線量当量率比（50 cm/1 m）は 0.88，各地点で算出した同比は 0.93 ± 0.09 であった。建屋の種類別の平均値で見ると，一般家屋内で 0.90，学校建屋内で 0.94，集会場内で 1.00 であった。また，周辺線量当量率比（50 cm/1 m）の線量依存性はやや負の相関があるものの，ほぼ一定であった。床面から 50 cm での周辺線量当量率が 1 m での周辺線量当量率と比較してやや低くなる傾向が認められたのは，建屋の床下には線源となる放射性核種の沈着が建屋周囲と比較して少ないためと予想されるが，この関係は部屋の建屋外壁からの距離や地中での線源分布によっても変わる可能性がある [15]。

他方，福島県が実施した環境放射線モニタリング [6]において公表された下記の 6 種類のデータ（2014 年 6 月末時点までの公表分で主に屋外で取得されたもの）を解析した結果は次のとおりであった。なお，同データの引用元については，この報告書の別添 B に掲載した。

(1)「福島県環境放射線モニタリング調査（温泉地）結果」
測定期間：2011 年 7 月～2013 年 9 月，データ数：1,738 データ
周辺線量当量率比（50 cm/1 m）：1.04±0.09（平均±標準偏差）（最小 0.75～最大 2.00）

(2)「福島県における学校等の環境放射線モニタリング調査結果について」
測定期間：2011 年 4 月～2012 年 3 月，データ数：4,456 データ
周辺線量当量率比（50 cm/1 m）：1.05±0.09（平均±標準偏差）（最小 0.49～最大 2.21）

(3)「福島県における学校等の環境放射線モニタリング調査結果について」
測定期間：2012 年 6 月～2013 年 1 月，データ数：1,493 データ
周辺線量当量率比（50 cm/1 m）：1.02±0.08（平均±標準偏差）（最小 0.71～最大 1.38）

(4)「福島県における学校等の環境放射線モニタリング調査結果について」
測定期間：2013 年 7 月～2013 年 8 月，データ数：1,394 データ
周辺線量当量率比（50 cm/1 m）：1.01±0.12（平均±標準偏差）（最小 0.75～最大 4.38）

(5)「福島県環境放射線モニタリング調査（観光地）結果」
測定期間：2011 年 7 月～2013 年 9 月，データ数：18,138 データ
周辺線量当量率比（50 cm/1 m）： 1.03±0.08（平均±標準偏差）（最小 0.57～最大 4.67）

(6)「福島県環境放射線モニタリング実施結果（集会場等）」
測定期間：2011 年 10 月～2013 年 11 月，データ数：48,009 データ [7]
周辺線量当量率比（50 cm/1 m）：0.95±0.09（平均±標準偏差）（最小 0.4～最大 2.53）

[6] 解析を行った時点では，原子力規制委員会の下記の HP に当該データが掲載されていたが，現在は福島県の HP から公開されている。
https://mapdb.jaea.go.jp/mapdb/selects/b101/?prefectures=07&category_b=b101&year=2011%2C2012%2C2013
[7] 元々のデータ数は 78,455 であったが，この中から「屋内」の記載のなかったものとバス車内で測定されたものを除外した。

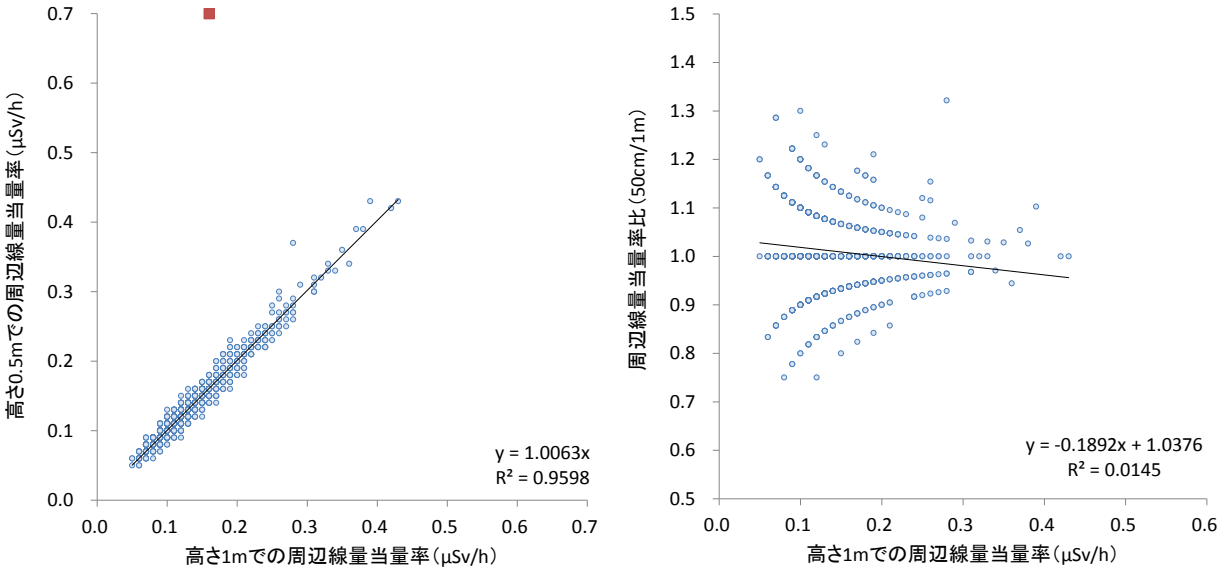

図 17 屋外の同一場所の高さ 50 cm 及び 1 m での周辺線量当量率の関係

（元データは（4）「福島県における学校等の環境放射線モニタリング調査結果について」

屋外で取得した周辺線量当量率比（50 cm/1 m）の関係は上記(1)～(6)で類似しているため，(4)の結果のみを図 17 に例示した。図 16 に示した結果と同様，二つの高さにおける周辺線量当量率には高い相関が見られたが，屋内で得られたデータと比較すると周辺線量当量率比（50 cm/1 m）は若干大きな値となり，上記(1)～(5)のデータの平均値は 1.01～1.05 であった。この結果は平山 [16]が示したシミュレーションによる放射性セシウムが広く地表付近に分布する場合の計算値（表 5）と比較的良く一致している。稀に周辺線量当量率比（50 cm/1 m）が 2 を大きく超えるケースがあるが [8]，これは測定場所の地表近傍に周囲に比べて高い線源が局在していた影響と思われる。

表 5 地表からの高さ毎の周辺線量当量率の計算値

地表面からの高さ	^{134}Cs	^{137}Cs
15 cm	0.0596 (1.07)	0.0219 (1.06)
50 cm	0.0577 (1.03)	0.0212 (1.03)
1 m	0.0558 (1.00)	0.0206 (1.00)

※ 元データは文献より引用。括弧外の数値は 1 Bq/cm^2 当りの周辺線量当量率（ただし，重量緩衝深さが 1 g/cm^2 の場合），括弧内の数値は高さ 1m での線量率に対する相対値

以上の結果から，福島県周辺の大部分の生活環境下では周辺線量当量率の高さによる変化は全体としては殆どなく，児童の個人線量当量を評価する場合においても，データがより多く取得されている地表面から 1 m の高さにおける周辺線量当量率を用いることは妥当である。

[8] 元データにおいて極端に高い 1 データのみ図 17（左）中に別シンボル（■）でプロットした。図 17（右）では省略。

6. 周辺線量当量－個人線量の年齢別換算係数

前報告において，周辺線量当量に換算係数（0.7）を乗じることで成人男性に対する個人線量を評価できることを示した。この換算係数の数値は，福島県内での実測に基づいて決定されたことは前述のとおりであるが，回転照射における周辺線量当量と個人線量当量の関係に整合することからも妥当と考えられた。体格の小さな児童に適した換算係数を決定するにあたり，回転照射条件における年齢毎の実効線量を参考とする。年齢毎の実効線量は，年齢別に定義された MIRD 型数学ファントム [9]の計算値 [17, 18]として Yamaguchi [19]によって算定されており，回転照射条件における結果は図 18 に示すとおりである。ただし，実効線量は周辺線量当量ではなく空気カーマに対する比として与えられている。

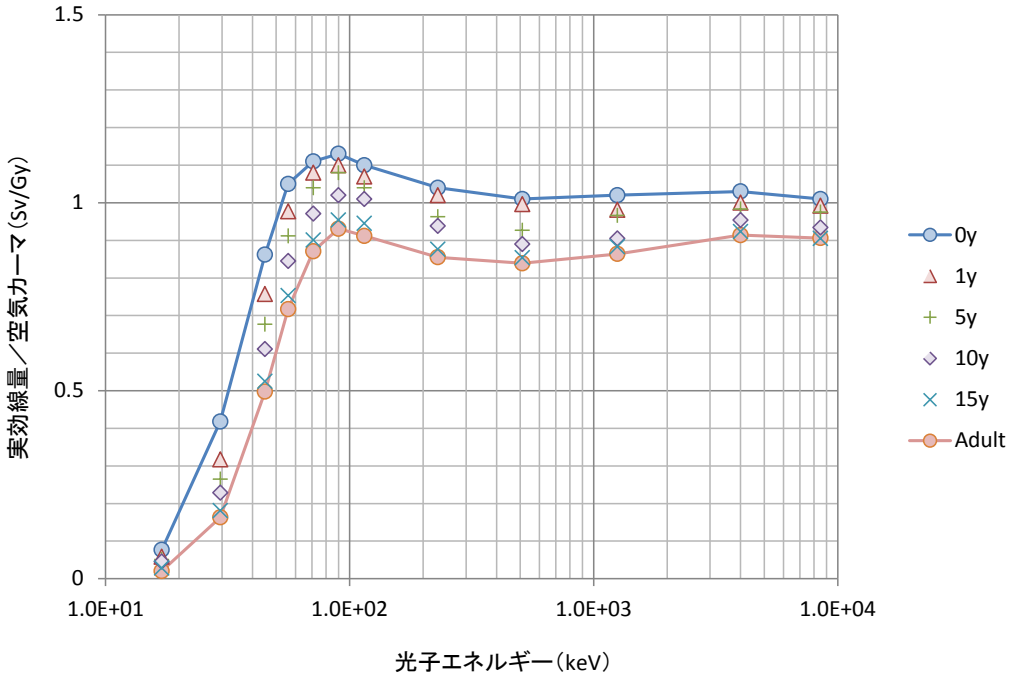

図 18 回転照射条件における年齢別ファントムの実効線量／空気カーマ比 [19]

Yamaguchi の結果を基に算出した周辺線量当量に対する実効線量の比を表 6 に示す [10]。成人に対する数値（0.70）が前報告書の数値（0.679）[11]と僅かに違うのは引用元が異なるためである。周辺線量当量から個人線量への換算係数を，回転照射条件における周辺線量当量と実効線量との関係に基づいて決定するのであれば表 6 の数値を用いれば良いが，個人線量計の応答の観点からも検討する必要がある。図 19 及び表 7 には，本実験で得られた個人線量計 A2 及び C の周辺線量当量に対する個人線量計測定値の比（回転照射）を示した（図 11 参照）。

---

[9] 数学（数値）ファントムは，文献（17, 18）に詳しく解説されている。

[10] 空気カーマから周辺線量当量への換算は ICRP Publication 74 [2]の Table A.21 のデータを用いて行える。同表にあるデータを補間して 662 keV（^{137}Cs）の換算係数を求めると 1.20（Sv/Gy）となる。^{134}Cs についても放出率で加重平均した実効エネルギーに対する換算係数は，^{137}Cs とほぼ変わらない。

[11] 前報告書表 2-3 参照

表 6 回転照射条件における実効線量／周辺線量当量比

	0 歳	1 歳	5 歳	10 歳	15 歳	成人
^{137}Cs*	0.84	0.82	0.77	0.74	0.72	0.70

*^{134}Cs に対する数値も ^{137}Cs とほぼ同じである。

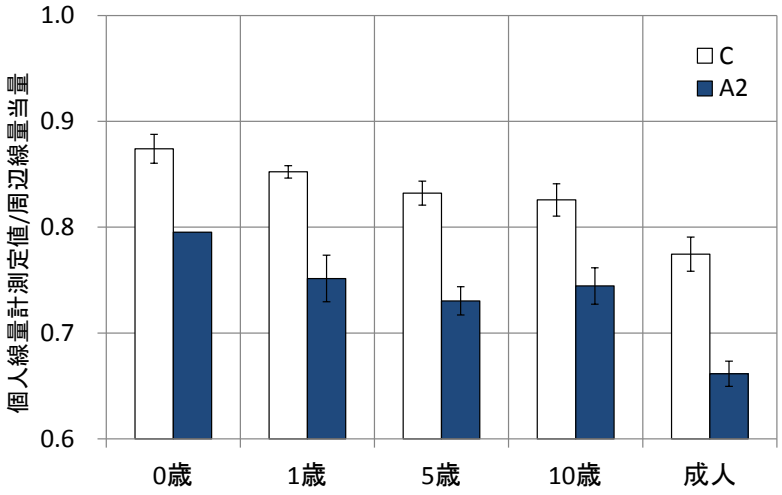

図 19 回転照射条件における個人線量計測定値／周辺線量当量比

（個人線量計 A2 は 0 歳児ファントムに 2 個しか設置できないため，それらの平均値のみを示した。）

表 7 回転照射条件における個人線量測定値／周辺線量当量比

ファントム	0 歳	1 歳	5 歳	10 歳	成人
個人線量計 A2	0.80 (0.95)	0.75±0.02 (0.91)	0.73±0.01 (0.95)	0.74±0.02 (1.01)	0.66±0.01 (0.94)
個人線量計 C	0.87±0.01 (1.04)	0.85±0.01 (1.03)	0.83±0.01 (1.08)	0.83±0.02 (1.12)	0.77±0.02 (1.10)

（括弧内の数値は，表 6 の同一年齢ファントムの数値に対する比）

図 20 は表 6 と表 7 の数値を直接比較した結果である。同図から，個人線量計 A2 では実効線量よりも低く，反対に個人線量計 C では実効線量よりも高く応答することが示唆される。ただし，両個人線量計ともに実効線量との差異は 1 割程度以内であり，回転照射条件では体格が大きく変化する児童に対しても個人線量を適切に測定することが確認された。なお，個人線量計 A2 が他の個人線量計と比較して低い測定値を示すことは前報告の現地調査でも確認されており [12]，実効線量を厳密に担保する必要があれば必要な感度補正を行うことも考えられる。他方，個人線量計 C の測定値が個人線量計 A2 に比べて高い理由は，図 21 に示す各個人線量計のエネルギー特性から分かるように，個人線量計 C では JIS で規定された ^{137}Cs を用いた基準照射に対して 15%程度過大になるように感度調整されているためである [20]。この独自の感度調整は，散乱成分の割合の多い環境下において，低エネルギー領域の検出感度が低下するエネルギー特性を補償するためと推察される。

[12] 前報告での現地調査において，平板型ファントムに設置した個人線量計 A2 及び C の個人線量計測定値の周辺線量当量に対する比は，様々な地点での測定値を最小二乗フィッティングして得られた結果として 0.6072 及び 0.7123 であった（前報告書の図 3-6 参照）。

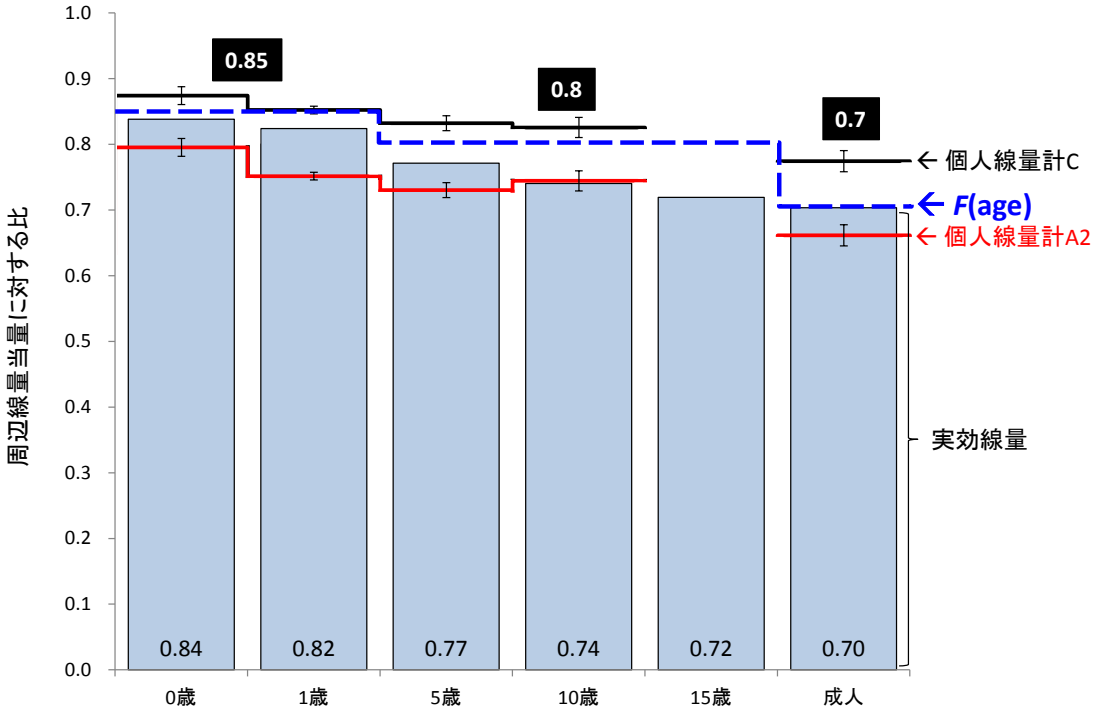

図 20 周辺線量当量に対する各年齢の実効線量（回転照射）または個人線量計測定値の比（同図中の縦棒は実効線量を示しており，^{137}Cs 及び ^{134}Cs の数値がほぼ同じであるため，^{134}Cs は省略，実線（赤，黒）が個人線量計測定値に対応する。点線（青）は年齢別換算係数F (age)である。）

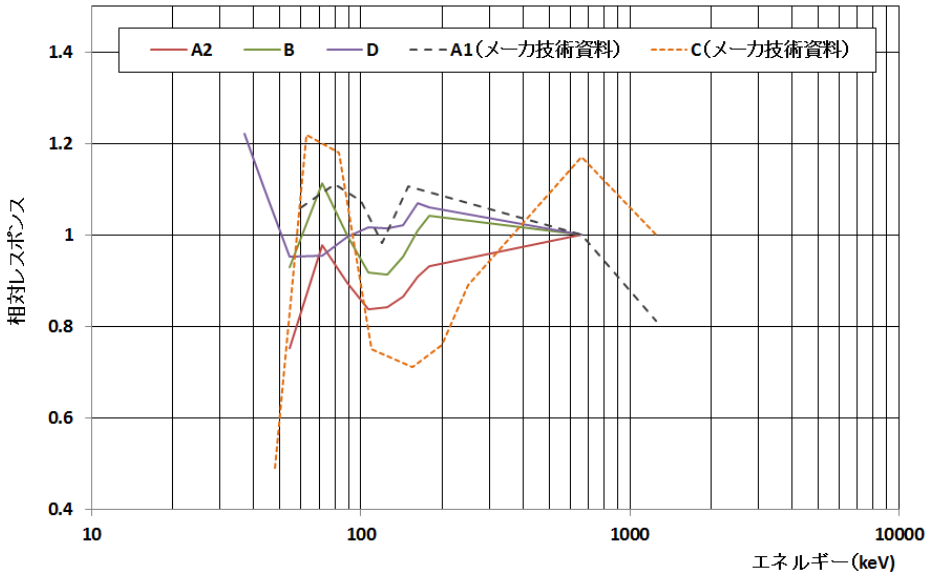

図 21 各個人線量計のエネルギー特性（^{137}Cs の対する相対レスポンス）[20]

図 20 中には，本研究で提案する年齢別の換算係数（*F(age)*と表記）を青点線で示した。同係数は，①成人に対する数値は前報告で提案された数値（0.7），②個人線量計測定値を参考にしつつ，児童に対しては実効線量を適切な範囲で過大に評価するように丸めた数値，として決定した。なお，15 歳児のファントムに対する個人線量計測定値の実験データはないため，10 歳児について決定した換算係数を 15 歳児にも割当てた。換算係数は，2 種類の個人線量計から得られた測定値の中間となる。年齢別の換算係数の数値は表 8 にも示した。換算係数を適用する適用する年齢区分は，現行の内部被ばく線量係数に適用される年齢区分と同様に，0 歳児区分（1 歳未満），1 歳児区分（1 歳以上 3 歳未満），5 歳児区分（3 歳以上 8 歳未満），10 歳児区分（8 歳以上 13 歳未満），15 歳児区分（13 歳以上 18 歳未満），成人区分（18 歳以上）[21]とした。回転照射条件以外の換算係数の適用については次章で考察する。

表 8 提案する周辺線量当量－個人線量換算係数

適用年齢	*F(age)*
生後から 3 歳になるまで	0.85
3 歳から 18 歳になるまで	0.8
18 歳以上	0.7

7. 考察

7.1 環境中における放射線場

前報告からのこれまでの議論において，福島県周辺の環境中における放射線場を回転照射に近似できるとしてきた。しかし実際には，図 22 に示すように土壌中に分布した放射性セシウムによって生じる外部被ばくの状況の方が多いと思われる。その場合，人体に入射する放射線の角度分布としては，遠方から飛来する放射線に起因する水平方向の成分の割合が最も高いが，近傍の地表面から人体を見上げる角度で入射する成分や上空の大気によって散乱されてくる成分が加わる [16, 22]。したがって，土壌中線源の場合も回転照射で近似することは妥当と言えるが，回転照射とは異なる特徴があることを認識する必要がある。特に，福島県内での環境モニタリングで見られるように，時間経過とともに放射性セシウムの土壌中深度が深くなると，近傍からの入射する成分の割合が相対的に増加するため，回転照射で近似することが適当でない状況が生じることが想定される。

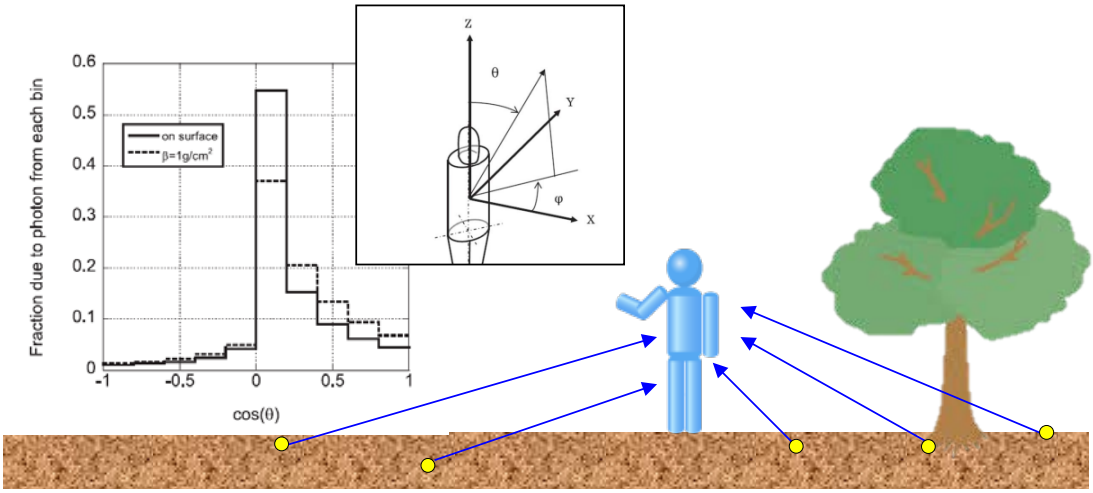

図 22 土壌中に分布する放射性セシウムによる外部被ばく状況

（図中のグラフは文献（16）から抜粋）

7.2 土壌中放射性セシウムを線源とする外部被ばく線量諸量の量的関係

土壌中に分布する放射性核種による外部被ばく線量評価に関する研究は，これまでにも数多く報告されている [23-27]。平山 [16]が，放射性セシウムが地表付近に広く分布する線源体系においてモンテカルロシミュレーションにより算定した周辺線量当量，個人線量当量及び実効線量（回転照射）の量的関係は図 23 に示すとおりであり，個人線量当量は周辺線量当量の 0.7～0.8 倍，実効線量の 0.97～1.05 倍であった。個人線量当量と周辺線量当量の量的関係は，本実験で得られた個人線量計測定値の結果と概ね一致している。ただし，平山の結果は，個人線量当量として Cristy 型ファントムの胴体部の中央においてファントム表面から 0.5 cm 前方に設定した個人線量計に対応する領域の計算値，これと比較した周辺線量当量として核種の重量緩衝深度 [13]が 1 g/cm² 及び地表高 15 cm, 50 cm

[13] 重量緩衝深度は，土壌深さ方向の放射能分布を$A(\zeta) = A_0 \cdot \exp(-\frac{\zeta}{\beta})$と与えたときの$\beta$（単位は，g/cm²）であり，地表面における放射能濃度A_0（Bq/kg）が 1/e になる深度として定義される。

及び 1 m の場合の計算値[14]，実効線量（回転照射）として Cristy 型ファントムに対する計算値としている。

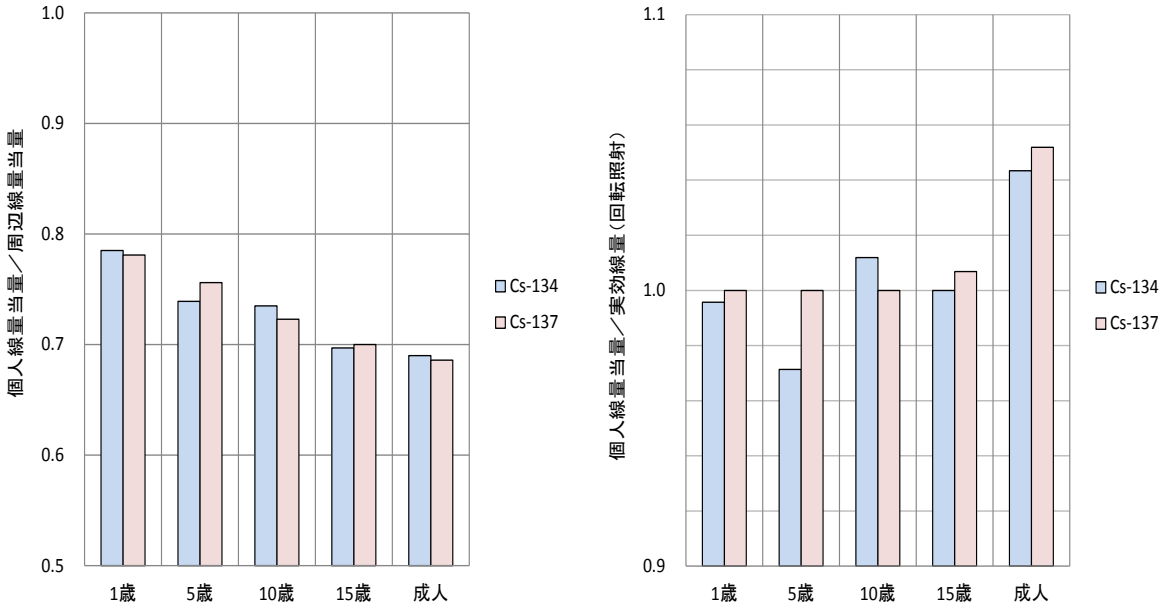

図 23 周辺線量当量，個人線量計測定値及び実効線量の関係

佐藤ら[28]も，同様な線源体系において，ICRP が今後の線量評価のために整備した乳児から成人までの男女合わせて計 12 体のリファレンスファントムを用いて，年齢毎の実効線量[15]と地上 1 m での周辺線量当量を計算した。その結果は図 24 に示すとおりであり，年齢の増加に伴い周辺線量当量に対する実効線量の比は減少するとともに，周辺線量当量は全ての年齢に対する実効線量を上回ることが明らかにされた。すなわち，土壌中線源の場合には，全ての年齢の個人に対して，その場の周辺線量当量率に滞在時間を乗じて個人が受ける外部被ばく線量を評価すれば，実効線量を過小評価することはないことを示している。Saito and Potoussi-Henss[27]も同様な計算を ICRP の成人男性リファレンスファントムと乳児（生後 8 週）ファントムについて行っている。佐藤らの結果によれば，放射性セシウムの重量緩衝深度の増加に伴い，上記の比は徐々に減少する傾向がある。最近の福島県及び近隣県における調査[29]によれば，2013 年 11 月時点における実効的な重量緩衝深さは 2.62 ± 1.99 g/cm^2 であり，全体として経過時間とともに増加する傾向が認められている。

[14] 地上高 15 cm，50 cm 及び 1 m の周辺線量当量を，1 歳児と 5 歳児，10 歳児と 15 歳児及び成人の個人線量当量と実効線量の比較対象とする。

[15] 各年齢の実効線量は，その年齢の男女のリファレンスファントム 2 体用いて計算される。詳しくは佐藤らの文献（26）を参照のこと。

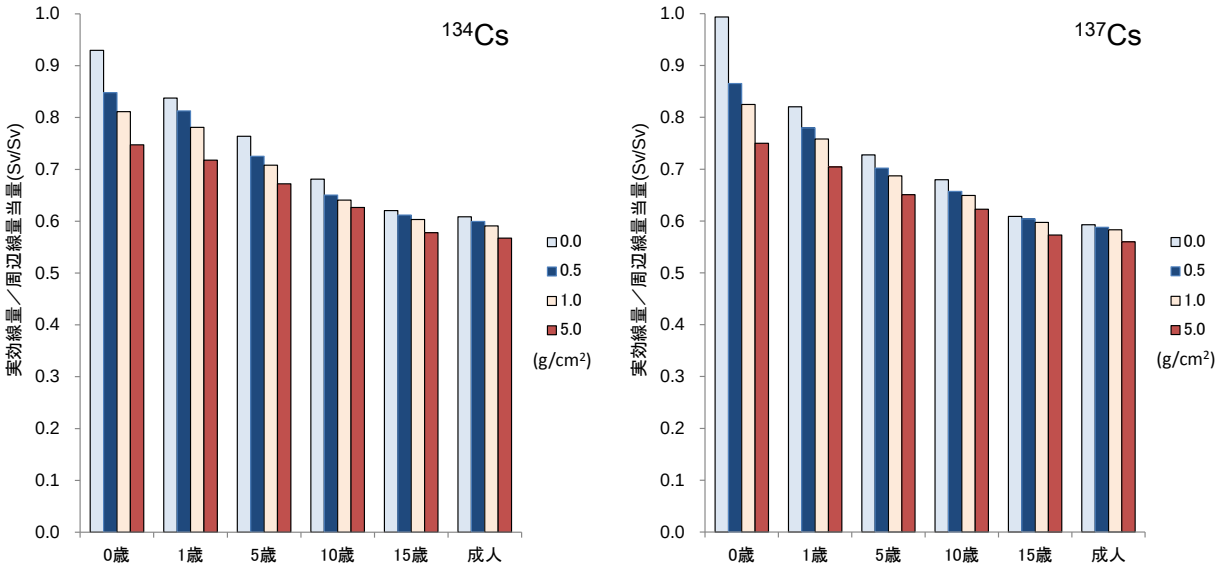

図 24 各年齢の周辺線量当量に対する実効線量の比（左：^{134}Cs，右：^{137}Cs）

（図中の 0.0，0.5，1.0 及び 5.0 は重量緩衝深さ（g/cm^2））

表 9 には，佐藤らの計算結果から線形補間によって求めた重量緩衝深度 2.5 g/cm^2 での実効線量の周辺線量当量に対する比を示した。計算に用いたファントムの形状が異なるため単純な比較は出来ないものの，表 6 に示した回転照射の方が土壌中線源と場合と比べて実効線量の周辺線量当量に対する比が大きくなる結果となっている [16]。これは，回転照射に比べて土壌中線源による照射の方が，立位人体中の臓器に入射する光子の割合が減少するためである。ただし，この割合は，放射性セシウムの重量緩衝深度によって変化する光子のエネルギースペクトルにも影響を受けるために単純ではない。図 25 には重量緩衝深度による実効線量の周辺線量当量に対する比の変化を年齢別に示しているが，その変化は成人よりも体格の小さな乳幼児の方が大きい。同図には，提案した年齢別の換算係数を赤点線で併せて表示したが，乳児（0 歳児）の重量緩衝深度 0 g/cm^2 と 0.5 g/cm^2 の場合を除き，実効線量を過大に評価することが分かる。また，10 歳児及び 15 歳児では，成人に対する換算係数である 0.7 を用いても，実効線量を過大評価することが分かる。図 26 には，図 25 と同様に，重量緩衝深度 2.5 g/cm^2 のときの実効線量と個人線量計の応答を比較して示した。実際の環境下で得られる個人線量計の応答は照射実験と異なることが予想されるが [17]，提案した換算係数を用いて評価する個人線量が実効線量を過小評価する可能性は福島周辺の環境では低いと考えられる。

16 佐藤らは成人ファントムに対してのみ，Yamaguchi(1994)と同様な MIRD 型ファントムに対する計算も行っている。それによれば，微小体積要素（ボクセル）によって構成されたリファレンスファントムと MIRD 型ファントムとの計算値の差異は概ね 5%以内であった。

17 前報告での照射室実験と現地試験の結果をみると，個人線量計 A2 では 0.64-0.65（照射室），0.6072（現地），個人線量計 C では 0.73-0.75（照射室），0.7123（現地）（※いずれも，平板型ファントム設置時の周辺線量当量に対する測定値の比）である。照射室実験及び現地試験の結果は前報告書の表 3-5 と図 3-6 にある。

表 9 土壌中線源（β = 2.5 g/cm²）における実効線量／周辺線量当量（地表高 1 m）比

	0 歳	1 歳	5 歳	10 歳	15 歳	成人
^{137}Cs*	0.80	0.74	0.67	0.64	0.59	0.57

*^{134}Cs に対する数値も ^{137}Cs とほぼ同じである。

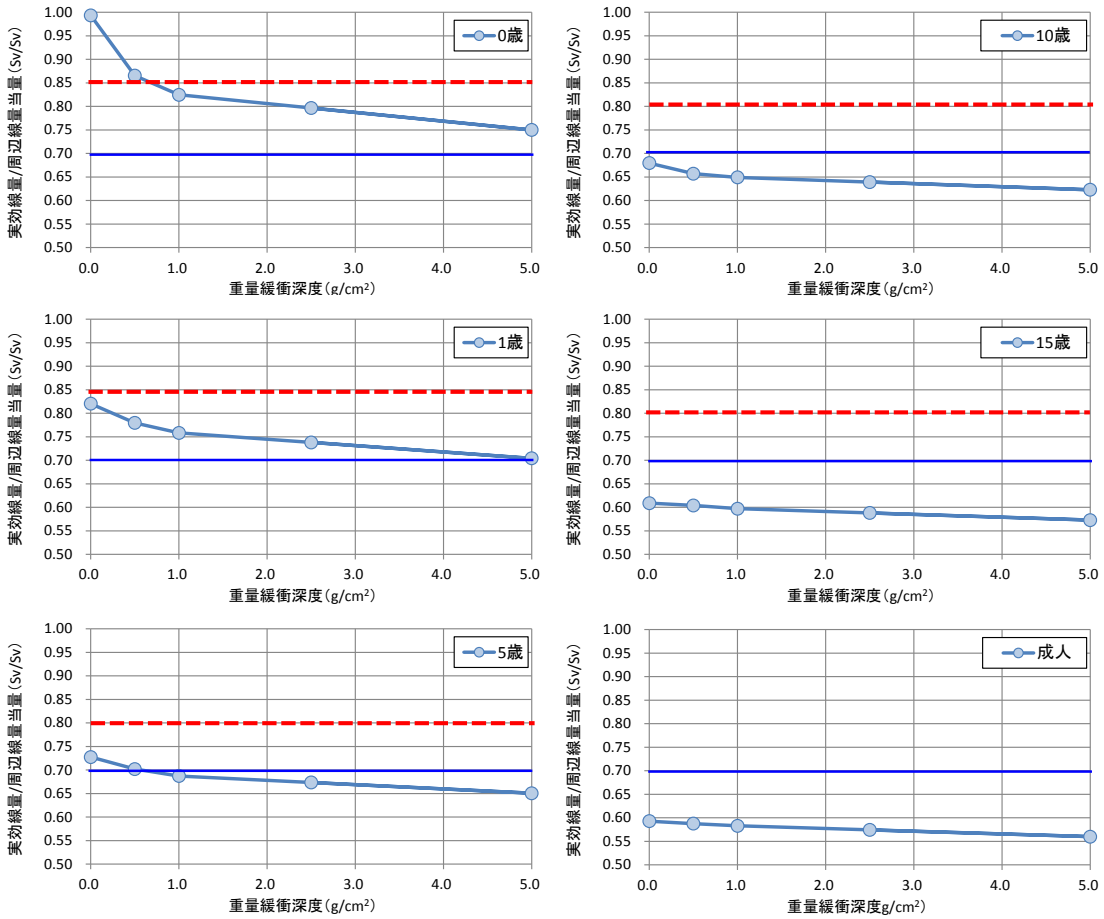

図 25 周辺線量当量に対する実効線量の比の重量緩衝深度による変化（^{137}Cs の場合）

（同図中の赤点線は本研究で決定した年齢別換算係数，青線は 0.7）

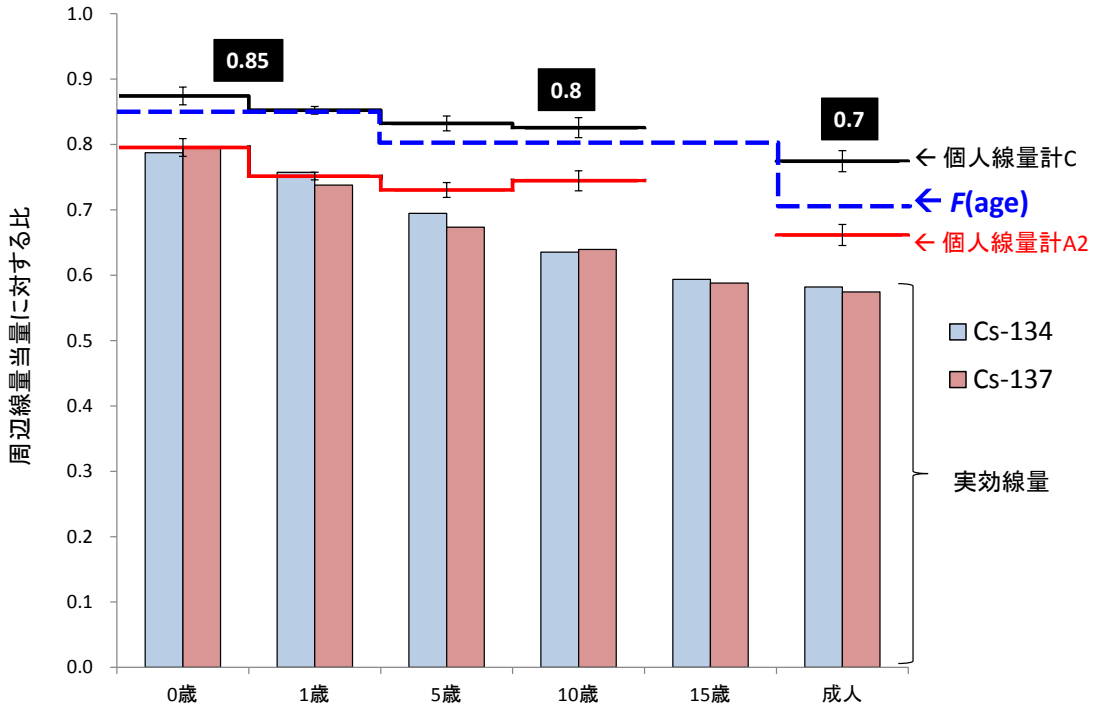

図 26 周辺線量当量に対する各年齢の実効線量（$\beta = 2.5$ g/cm^2）または個人線量計測定値の比
（同図中の縦棒が実効線量，実線（赤，黒）が個人線量計測定値に対応する。点線（青）は年齢別換算係数F (age)である。）

7.3 前報告で出された課題の検討

前報告書において，個人線量の推定精度を一層向上させるための課題として以下の項目があげられた。最新の知見を踏まえて，これらの項目に対する考察を次に述べる。

(1) 空間線量率[18]から個人線量の推定

● 体格差が個人線量測定に与える影響

児童に対する個人線量測定の精度は社会的影響が大きいと考えられることから，本研究でも優先してこれに取り組んだ。本研究の照射実験では，回転照射条件において 0 歳児と成人を模擬したそれぞれの人体形状ファントムに設置した個人線量計の応答の差異として，前者が後者に比べて 1～2 割程度高く，場の周辺線量当量により近い測定値が得られた。実際の環境中における個人線量計の応答に関しては現地試験によって更に詳細な特性情報が得られると期待されるが，場の周辺線量当量から個人線量を評価する場合は，提案した換算係数を用いることで十分である。

● 屋内外での個人の姿勢が個人線量に及ぼす影響

地表面線源の場合，人体姿勢による実効線量の変動は，20%～30%程度存在するとされており[22, 25]，実効線量は直立した状態の方が横たわった状態に比べて高くなる。これは，前述のように，地表面に対して水平方向のγ線成分の割合が多いために，直立した状態では人体の自己遮へい効

[18] 前報告書では空間線量率と記載されているが，ここでは周辺線量当量率と読み替える。

果が小さくなるのに対し，横たわった状態では身長方向からのγ線成分の割合が増加するために人体の自己遮へい効果が大きくなるためである。したがって，地表面線源の場合には，直立した状態を考えるのが最も保守的な被ばく線量評価となる。

屋外において前屈姿勢をとる状況，または，屋内において座位姿勢をとる状況での個人線量に関しては，①屋内外によらず周辺線量当量率の高さによる変化（50 cm と 1 m において）は小さいこと，②屋外での前屈姿勢では人体の自己遮へい効果は直立した状態と横たわった状態の両者の場合の中間になると考えられること等から，年間を通じた個人線量の推定に与える影響は軽微と予想する。ただし，屋外で個人線量を実測する場合，体幹部に装着される個人線量計には多方向からγ線が入射するため，様々な姿勢での個人線量計の応答を調査することは個人線量計のより詳細な特性を把握する上でも有効であろう。

● 個人線量計のエネルギー応答特性の影響

前報告書において，「…同一環境での複数タイプの個人線量計の比較試験を更に蓄積するとともに，場のガンマ線スペクトルの分類を行うことが，個人線量測定の精度向上に有効である…」とした。前回調査の現地測定において，5 種類の個人線量計の応答の差異は 10%程度以内であった。他方，ファントムに設置した個人線量計 A2 及び C の照射室及び現地での応答（個人線量計測定値の周辺線量当量に対する比）を比較すると，僅かではあるが現地での応答の方が低くなる結果が得られている [19]。放射線場（現地と照射場）の違いによる個人線量計の応答差は，今回の調査結果の利用に大きな影響を及ぼすものではないが，より詳細な議論のためには，現地試験のデータの蓄積とともに，場のγ線エネルギースペクトルやγ線の方向分布などの解析も併せて有効だと考えられる。

● 空間線量分布の影響

前報告書では，個人線量の推定の際における屋内と屋外の放射線分布の不均一性の影響，建物の形状による屋内の放射線分布の変化の影響，周囲の建屋による放射線遮へい状況の影響，積雪と降雨の気象条件の影響等について言及した。しかしながら，これらの要因の全てを実測によって個別に解明することは困難であることから，シミュレーション等を活用した評価を行うことが有効であるとした。

建屋の遮へい効果については，福島第一原子力発電所事故以降の住民の外部被ばく線量評価において IAEA の資料 [30]が引用される場合が多かったが，日本の建屋に対するデータに基づくものでないため問題視されてきた。ただし，前調査における現地測定やその後公表された論文 [31]においても IAEA のデータと類似した結果が得られており，比較的低い周辺線量当量率（概ね 0.2 μSv/h 程度未満）では，屋内と屋外の周辺線量当量率の比で定義される建屋の低減係数は増加する傾向が見られるものの，自然放射線による寄与を除けば IAEA のデータに近い結果となる。過去に行われた自然放射線に対する建屋の低減効果による国民線量評価への影響に関する研究では，コンクリート建屋が多い都市部でもその低減効果は 1 割未満と見積もられている [32]。他方，建屋の低減係数に関しては，建屋の詳細なモデルに基づくシミュレーション研究が成果を挙げて

[19] 本報告書 27 頁の脚注 17 参照

いる[15, 33, 34]。得られた結果を要約すると，木造家屋では外壁の遮へい効果が低いために，家屋の面積が広いほど，また，外壁から距離を離れるほど線量が低減するのに対し，コンクリート構造の建物では，外壁の遮へい効果が高いために，屋外に接する窓付近以外は線量が全体的に低くなる。積雪や降雨による影響に関しては，福島県内でのデータが今後蓄積されて明らかにされると思われるが，積雪が実効線量に与える理論的評価は既に Saito[35]によってなされている。

- 地理的影響

山間部以外で代表的環境と考えられる平野部における換算係数の精度は既に本報告において考察したとおりである。非常に極端なケースとして，人体の背面あるいは側面のいずれか一方からしかγ線が入射しない外部被ばく状況を考える必要がある場合には，それぞれの照射条件に応じた実効線量係数[36]を用いて線量評価を別途行うことも考えられる。

(2) 事故以前の空間線量率（バックグラウンド）の評価

前報告では，代表的生活パターンによる個人線量の推定において，自然放射線による空間線量率を 0.04 μSv/h とした。この数値の根拠は古田[37]によって解説されているが，これは実効線量であることに注意する必要があるとしている[20]。基になるデータは，全国平均としての自然放射線からの空間線量率（5.8 μR/h）から来ている。我が国における空間線量率の比較的詳細な分布については，若干古いが阿部による研究[38]が参考になる。福島県内 21 カ所で取得された空間線量率は 9.8±1.4 μR/h であり，実効線量に換算すると 0.064±0.009 μSv/h となる。したがって，自然放射線から受ける被ばく線量は福島県内でも標準偏差にして約 15%程度のばらつきを有することになるが，前述した姿勢による実効線量の変動に比べても小さく，地域毎に考える必要は特に無いように思われる。また，バックグラウンドとして 0.04 μSv/h を用いて追加被ばくによる個人線量を評価することは，福島県内ではやや保守的な評価であると言える。なお，福島県住民の初期外部被ばく線量の推計では，自然放射線による線量寄与分を 0.03 μSv/h としている[7]。

(3) ガンマ線波高分布の活用

前報告書でも述べているように，γ線エネルギースペクトルを用いて自然放射線による寄与を除いた個人線量の評価を行うことが可能である。その一例が Kurosawa ら[39]によって最近報告されている。同報告は 4 カ所の地点に限られているが，未除染の場所と除染済みの場所におけるγ線エネルギースペクトルの特徴の違いを示しており，各エネルギー領域が周辺線量当量率に占める割合を評価している。このような研究の他にも，現地で取得したγ線エネルギースペクトルを線源情報として，実効線量を評価するためのシミュレーションを行うことが考えられる。

(4) 生活時間の推定

前報告では，内閣府原子力災害対策本部・原子力被災者生活支援チームの依頼により，代表的な生活パターンを仮定した職業人の年間線量を現地調査で実測した周辺線量当量率を基に推計したが，その際，人の行動は年間を通じて毎日同じではなく，また，日常生活における滞在場所も

[20] 5.8 μR/h = 0.050 μGy/h （∵1R = 8.7 mGy）これに自然放射線における等方照射による換算係数 0.748 を乗じて，実効線量で表すと 0.038 μSv/h となる。この値を丸めた 0.04 μSv/h が広く使われている。

多岐に亘ることから，特定の個人を対象とした正確な個人線量を行うには現状では未だ難しいと認識された。Naito ら [40]は，本研究でも使用した個人線量計 C を 26 名のボランティアに配布し，得られた個人線量計測定値と個人の生活行動との関連を分析しているが，その中で個人線量計測定値と航空機モニタリングによる周辺線量当量マップから推定される個人線量との関係を調べ，両者の関係が大きくばらつく結果を示している。したがって，周辺線量当量率マップから個人線量を推定する際は，基になるマップの空間分解能や時間変化にも注意が必要である。一方で，前報告で示したような日常生活行動に関する統計データに基づく個人線量の推計は，現存被ばく状況における参考レベルを決定する上での一つの材料となる。今後，各個人の生活を反映したより詳細な個人線量の推計を実施する必要がある場合には，住民の方々の協力を得て，個人の行動情報と併せた個人線量計測定値の解析を行うことが有効と考えられる。

8. まとめ

2014 年 4 月に公表した報告において，福島県内での個人線量測定やファントムを用いた照射実験に基づき，周辺線量当量から個人線量への換算係数（0.7）を決定した。ただし，この換算係数は成人男性の体格に応じたものであり，体格の異なる児童については別途検討する必要があった。本研究では，様々な年齢や体格の個人に適用可能な換算係数を導出するため，年齢の異なる児童の体格を模擬した人体形状ファントムに設置した個人線量計の応答を照射実験によって調べるとともに，様々な放射線場において評価された年齢毎の実効線量と個人線量計測定値を比較した。検討結果に基づき，個人線量評価に用いる換算係数を，0.85（生後から 3 歳になるまで），0.8（3 歳から 18 歳になるまで），0.7（18 歳以上）とすることを提案した。これらの換算係数を用いることで，個人線量を適切かつ簡便に評価できると考える。また，本研究で行った照射実験により，個人線量計を装着する個人の体格に関係なく，個人線量計から得られる測定値が実効線量の優れた指標になることが確認された。

福島第一原子力発電所事故以降，福島県内外において，個人線量計を用いた住民の被ばく線量の測定がこれまでにも数多く行われきた。しかしながら，個人線量計によって得られる数値が，被ばく線量の適切な指標となっているかは十分に検証されてこなかったように思われる。本研究は，これまでに実施されたあるいは今後実施される個人線量計を用いた測定の有効性を裏付けるものとしても重要である。

参考文献等

1) (独)放射線医学総合研究所，(独)日本原子力研究開発機構，東京電力㈱福島第一原子力発電所事故に係る個人線量の特性に関する調査，NIRS-M-270 (2014).
2) 日本アイソトープ協会, ICRP Publication 74　外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数（日本語訳）(1998).
3) 放射線防護に用いられる線量概念，日本原子力学会誌，Vol. 55, No. 2 83-96 (2013).
4) 村上博幸，南健太郎，外部放射線に対する防護のための計測線量，日本原子力学会誌, 33, 747-756 (1991).
5) 南健太郎，外部被ばくに関する実用量の考察と解説，RADIOISOTOPES, 49, 417-429 (2000).
6) 原子力安全技術センター，被ばく線量の測定・評価マニュアル (2000).
7) K. Akahane et al., NIRS external dose estimation system for Fukushima residents after the Fukushima Dai-ichi NPP accident, Sci. Rep|3: 1670 (2013).
8) 体表的なサーベイメータの方向特性,
Available at https://www.remnet.jp/lecture/forum/sh05_02.html
9) 日本規格協会，個人線量計校正用ファントム，JIS Z 4331 (2005).
10) CIRS, ATOM® Dosimetry Phantoms Model 701-706. Available at http://www.cirsinc.com/products/modality/33/atom-dosimetry-verification-phantoms/
11) RANDO® phantoms. Available at http://www.phantomlab.com/products/rando.php
12) X 線棟標準線源室における線量率の空間分布, NIRS-M-205,
Available at http://web.nirs.go.jp/HomePage/Kiban/gijyutu/nirs_tech/index/h20_2008.html
13) 壽藤紀道，“今こそ復習!”主任者の基礎知識 第 11 回様々な線量，Isotope news, No. 708, 90-93 (2013)
Available at http://www.jrias.or.jp/books/201304_SYUNINSYA_SUDO.pdf
14) 福島県，児童施設，学校，公共施設，観光地などの空間線量率測定結果
Available at http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/idou-monitoring.html
15) 古田琢哉，高橋史明，環境に沈着した事故由来の放射性セシウムからのガンマ線に対する建屋内の遮蔽効果及び線量低減効果の解析，JAEA-Research 2014-003 (2014).
16) 平山英夫, EGS5 による地表付近に広く分布した ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の環境における個人線量計の評価, RADIOISOTOPES, 62, 335-345 (2013).
17) 斎藤公明，人体ファントム高度化の意義とその方向，保健物理，33，255-263 (1998).
18) 山口恭弘，数学ファントムと放射線防護への適用，RADIOISOTOPES, 47, 844-854 (1998).
19) Y. Yamaguchi, Age-dependent effective doses for external photons, Radiat. Prot. Dosim. 55, 123-129 (1994).
20) 小島尚美ら，日本保健物理学会第 47 回研究発表会 (2014).
21) Internal Commission on Radiological Protection, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4 Inhalation Dose Coefficients, ICRP Publication 71 (1995).
22) 斎藤公明，遠藤章，福島周辺における空間線量率の測定と評価 Ⅲ環境γ線の特徴と被ばく線量との関係，RADIOISOTOPES, 63, 585-602 (2014).
23) 斎藤公明，森内茂，環境γ線の性質と被曝評価，日本原子力学会誌，28, 725-730 (1996).

24) H.L. Beck, Exposure rate conversion factors for radionuclides deposited on the ground, EML-378 (1980).
25) K. Saito, N. Petoussi-Henss and M. Zankl, Computational of the effective dose and its variation from environmental gamma ray sources, Health Phys. 74, 698-706 (1998)
26) K. Saito, N. Ishigure, N. Petoussi-Henss and H. Schlattl, Effective dose conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground, Radiat. Environ. Biophys, 51, 411-423 (2012).
27) K. Saito and N. Petoussi-Henss, Ambient dose equivalent coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground, J. Nucl. Sci. Technol., 51, 1274-1287 (2014).
28) 佐藤大樹，古田琢哉，高橋史明，遠藤章，土壌に分布した放射性セシウムによる外部被ばく線量換算係数の計算，JAEA-Research 2014-017 (2014).
29) 松田規宏，斎藤公明，土壌中の放射性セシウムの深度分布調査，平成 25 年度東京電力㈱福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立的事業成果報告書 (2014) Available at http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/10000/9735/33/1-7_depthsurvey.pdf
30) IAEA, Planning for off-site response to radiation accidents in nuclear facilities, IAEA-TECDOC-225 (1979)
31) Yoshida-Ohuchi, M. Hosoda, T. Kanagami, M. Uegaki, H. Tashiro, Reduction factors for wooden houses due to external γ-radiation based on in situ measurements after the Fukushima nuclear accident, Sci. Rep|4: 7541 (2014).
32) 中村尚司，伊藤和夫，善村利秋，自然放射線に対する建造物遮蔽効果と国民線量評価への影響，保健物理 115, 135～146 (1980).
33) 古田琢哉，高橋史明，放射性 Cs による土壌汚染環境での各種建物による線量低減，TRACER, 727, 27-29 (2014).
34) T. Furuta, F. Takahashi, Study of radiation dose reduction of buildings of different sizes and materials, J. Nucl. Sci. and Technol, (in press).
35) Saito, External dose due to terrestrial gamma rays on the snow cover, Radiat. Prot. Dosim, 35, 31-39 (1991).
36) C. Lee, C. Lee, W. E. Bolch, Age-dependent organ and effective dose coefficients for external photons: a comparison of stylized and voxel-based paediatric phantoms, Phys. Med. Biol. 51, 4663-4688
37) 古田定明，除染基準 0.23μSv/h は本当に年間 1 mSv なのか?，Isotope News，718，46-49 (2014).
38) 阿部史郎，わが国における自然の空間放射線分布の測定，保健物理，17, 169-193 (1982).
39) T. Kurosawa, H. Iwase and N. Saito, Field photon energy spectra in Fukushima after the nuclear accident, J. Nucl. Sci. and Technol., 51, 730-734 (2014)
40) W. Naito, M. Uesaka, C. Yamada and H. Ishii, Evaluation of dose from external irradiation for individuals living in areas affected by the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, Radiat. Prot. Dosim, 163, 353-361 (2015).

別添 A

実験データ

表 A　人体形状ファントムに設置した個人線量計測定値

(1) ファントム体幹部の中央列に個人線量計 C を設置

	成人			0 歳			1 歳			5 歳			10 歳		
角度（°）	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比
0	0.71	1%	1.09	0.69	1%	1.06	0.69	0%	1.06	0.69	1%	1.07	0.70	1%	1.08
30	0.70	1%	1.08	0.68	0%	1.04	0.68	1%	1.04	0.69	0%	1.06	0.69	0%	1.07
60	0.66	1%	1.02	0.65	1%	0.99	0.64	1%	0.99	0.66	0%	1.01	0.66	1%	1.01
90	0.59	2%	0.91	0.58	1%	0.90	0.58	2%	0.89	0.59	3%	0.91	0.59	1%	0.91
120	0.25	19%	0.38	0.38	6%	0.59	0.39	15%	0.60	0.28	6%	0.43	0.38	14%	0.58
150	0.23	27%	0.35	0.41	7%	0.63	0.37	10%	0.57	0.33	14%	0.51	0.30	12%	0.47
180	0.22	10%	0.34	0.40	4%	0.61	0.34	2%	0.52	0.31	3%	0.48	0.27	9%	0.41
210	0.25	28%	0.38	0.41	5%	0.63	0.40	10%	0.61	0.39	22%	0.60	0.33	20%	0.51
240	0.29	25%	0.45	0.62	4%	0.95	0.47	15%	0.72	0.32	7%	0.49	0.37	10%	0.57
270	0.67	1%	1.04	0.66	1%	1.01	0.66	1%	1.02	0.68	2%	1.04	0.67	1%	1.03
300	0.70	1%	1.07	0.68	1%	1.04	0.68	0%	1.05	0.69	1%	1.06	0.69	1%	1.06
330	0.71	1%	1.09	0.69	1%	1.06	0.69	0%	1.05	0.70	0%	1.07	0.70	1%	1.07
角度平均	0.50	2%	0.77	0.57	1%	0.88	0.55	1%	0.84	0.53	1%	0.81	0.53	1%	0.81
回転照射	0.50	2%	0.77	0.57	2%	0.87	0.55	1%	0.85	0.54	2%	0.83	0.53	2%	0.82

(2) ファントム体幹部の左列に個人線量計 C を設置

	成人			0 歳			1 歳			5 歳			10 歳		
角度（°）	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比
0	0.71	1%	1.09	—	—	—	0.69	1%	1.06	0.69	0%	1.07	0.70	1%	1.07
30	0.71	1%	1.10	—	—	—	0.69	0%	1.06	0.70	1%	1.07	0.70	1%	1.08
60	0.69	1%	1.07	—	—	—	0.68	1%	1.04	0.68	1%	1.04	0.69	1%	1.06
90	0.66	2%	1.02	—	—	—	0.64	1%	0.98	0.65	0%	1.00	0.65	1%	1.00
120	0.52	28%	0.80	—	—	—	0.58	1%	0.89	0.59	12%	0.91	0.59	2%	0.92
150	0.29	11%	0.45	—	—	—	0.38	3%	0.58	0.39	14%	0.60	0.39	13%	0.60
180	0.28	30%	0.43	—	—	—	0.40	18%	0.62	0.36	17%	0.56	0.34	22%	0.53
210	0.20	14%	0.30	—	—	—	0.32	5%	0.49	0.30	8%	0.46	0.25	8%	0.38
240	0.19	14%	0.30	—	—	—	0.30	9%	0.46	0.27	15%	0.41	0.27	13%	0.41
270	0.42	20%	0.64	—	—	—	0.64	1%	0.98	0.64	1%	0.99	0.52	15%	0.80
300	0.68	2%	1.05	—	—	—	0.66	1%	1.01	0.68	0%	1.05	0.67	1%	1.04
330	0.70	1%	1.07	—	—	—	0.68	1%	1.04	0.69	1%	1.06	0.69	0%	1.06
角度平均	0.50	3%	0.78	—	—	—	0.55	2%	0.85	0.55	2%	0.85	0.54	2%	0.83
回転照射	0.50	2%	0.77	—	—	—	0.56	1%	0.86	0.54	1%	0.83	0.54	2%	0.83

(3) ファントム体幹部の右列に個人線量計 C を設置

	成人			0 歳			1 歳			5 歳			10 歳		
角度（°）	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比
0	0.70	1%	1.08	—	—	—	0.68	1%	1.04	0.70	0%	1.07	0.69	1%	1.07
30	0.67	2%	1.04	—	—	—	0.64	1%	0.99	0.67	0%	1.03	0.67	1%	1.03
60	0.62	9%	0.95	—	—	—	0.58	6%	0.89	0.67	1%	1.02	0.65	2%	1.00
90	0.33	17%	0.51	—	—	—	0.54	18%	0.84	0.61	3%	0.94	0.60	4%	0.92
120	0.18	10%	0.27	—	—	—	0.28	10%	0.43	0.23	10%	0.36	0.27	11%	0.41
150	0.21	17%	0.32	—	—	—	0.34	15%	0.52	0.29	5%	0.44	0.24	8%	0.37
180	0.30	31%	0.47	—	—	—	0.42	8%	0.64	0.39	20%	0.59	0.34	20%	0.53
210	0.31	12%	0.48	—	—	—	0.47	11%	0.72	0.38	16%	0.58	0.40	13%	0.61
240	0.58	23%	0.89	—	—	—	0.65	3%	1.01	0.61	11%	0.94	0.63	2%	0.96
270	0.69	1%	1.07	—	—	—	0.68	1%	1.04	0.68	0%	1.05	0.67	1%	1.04
300	0.70	3%	1.07	—	—	—	0.69	1%	1.05	0.69	1%	1.06	0.69	1%	1.06
330	0.72	3%	1.10	—	—	—	0.69	1%	1.07	0.70	0%	1.07	0.70	0%	1.07
角度平均	0.50	3%	0.77	—	—	—	0.56	2%	0.85	0.55	2%	0.85	0.55	2%	0.84
回転照射	0.51	3%	0.78	—	—	—	0.55	1%	0.85	0.54	1%	0.83	0.54	2%	0.83

(4) 全列の個人線量計 C の平均値

	成人			0 歳			1 歳			5 歳			10 歳		
角度（°）	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比	指示値	1σ（%）	$H^*(10)$比
0	0.71	1%	1.09	0.69	1%	1.06	0.68	1%	1.05	0.69	0%	1.07	0.70	1%	1.07
30	0.70	3%	1.07	0.68	0%	1.04	0.67	3%	1.03	0.68	2%	1.05	0.69	2%	1.06
60	0.66	7%	1.01	0.65	1%	0.99	0.63	7%	0.97	0.67	1%	1.03	0.66	3%	1.02
90	0.53	28%	0.81	0.58	1%	0.90	0.59	11%	0.90	0.62	5%	0.95	0.61	5%	0.94
120	0.31	55%	0.48	0.38	6%	0.59	0.41	33%	0.64	0.37	46%	0.57	0.41	35%	0.64
150	0.24	23%	0.37	0.41	7%	0.63	0.36	10%	0.56	0.34	18%	0.52	0.31	24%	0.48
180	0.27	29%	0.41	0.40	4%	0.61	0.39	14%	0.59	0.35	17%	0.54	0.32	21%	0.49
210	0.25	27%	0.39	0.41	5%	0.63	0.40	18%	0.61	0.36	20%	0.55	0.32	24%	0.50
240	0.35	53%	0.54	0.62	4%	0.95	0.47	34%	0.73	0.40	41%	0.61	0.42	38%	0.65
270	0.59	23%	0.92	0.66	1%	1.01	0.66	3%	1.02	0.67	3%	1.03	0.62	14%	0.96
300	0.69	2%	1.07	0.68	1%	1.04	0.68	2%	1.04	0.69	1%	1.06	0.69	1%	1.05
330	0.71	2%	1.09	0.69	1%	1.06	0.68	1%	1.05	0.69	1%	1.07	0.69	1%	1.07
角度平均	0.50	3%	0.77	0.57	1%	0.88	0.55	2%	0.85	0.54	3%	0.84	0.54	2%	0.83
回転照射	0.50	2%	0.77	0.57	2%	0.87	0.55	1%	0.85	0.54	1%	0.83	0.54	2%	0.83

1. 個人線量計の設置数は 0 歳，1 歳，5 歳，10 歳，成人でそれぞれ 3 個，3 個，4 個，5 個，6 個

2. 照射した線量は 0.65mSv

3. 0 歳児ファントムは個人線量計の設置位置は中央列のみ

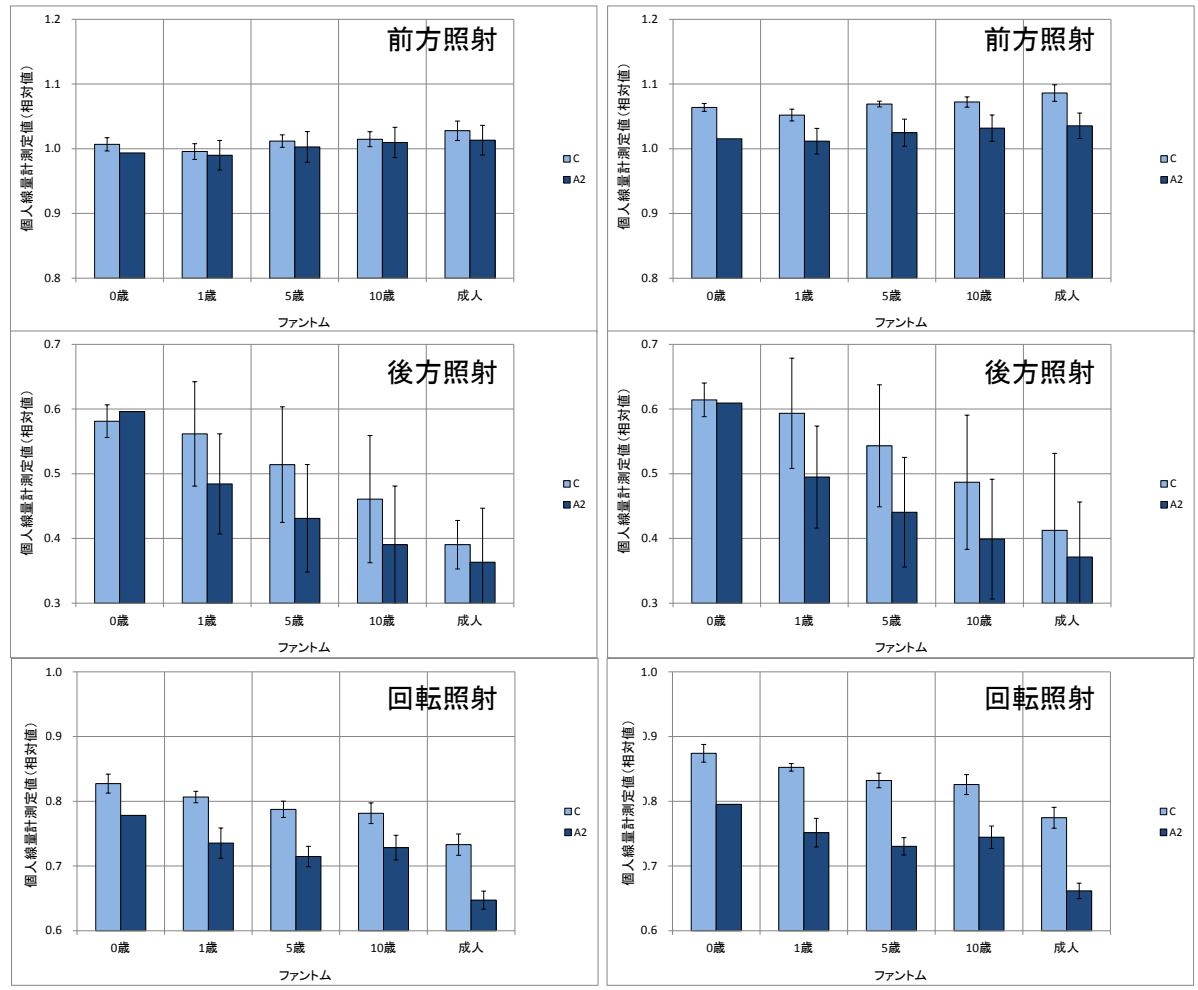

図 A1 前方，後方及び回転照射における個人線量計（A2，C）の応答

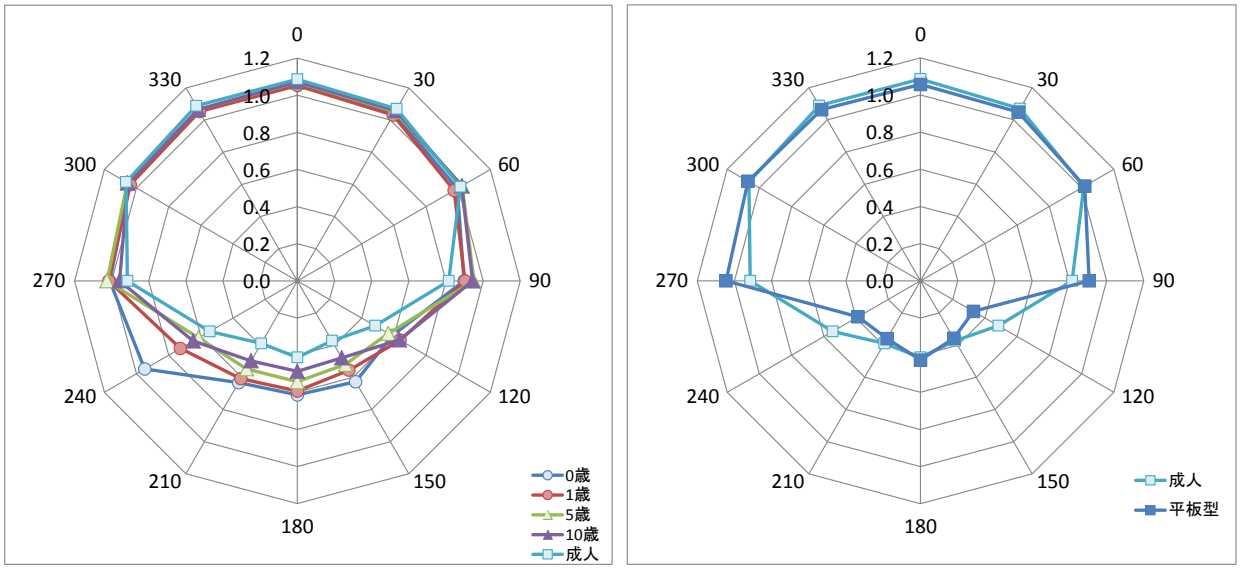

図 A2 各ファントム設置時における個人線量計の方向特性－周辺線量当量比（個人線量計 C）

別添 B

福島県内における周辺線量当量率の解析に使用したデータの引用元

(1)「福島県環境放射線モニタリング調査（温泉地）結果」
測定期間：2011 年 7 月～2013 年 9 月，データ数：1,738 データ
http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/kankouti-1.html
http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/kankouti-2.html
http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/kankouti-3.html
http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/kankouti-4.html
http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/kankouti-5.html
http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/kankouti-6.html

(2)「福島県における学校等の環境放射線モニタリング調査結果について」
測定期間：2011 年 4 月～2012 年 3 月，データ数：4,456 データ
http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/school-1.html
http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/school-2.html
http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/school-3.html
http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/school-4.html

(3)「福島県における学校等の環境放射線モニタリング調査結果について」
測定期間：2012 年 6 月～2013 年 1 月，データ数：1,493 データ
http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/school-5.html
http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/school-6.html

(4)「福島県における学校等の環境放射線モニタリング調査結果について」
測定期間：2013 年 7 月～2013 年 8 月，データ数：1,394 データ
http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/school-7.html

(5)「福島県環境放射線モニタリング調査（観光地）結果
測定期間：2011 年 7 月～2013 年 9 月，データ数：18,138 データ
引用元は(1)と同じ [21]

[21] (1)と(5)のデータが統合されたため，

(6) 「福島県環境放射線モニタリング実施結果（集会場等）」

測定期間：2011 年 10 月～2013 年 11 月，データ数：48,009 データ [22]

http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/syukaijo-1.html

http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/syukaijo-2.html

http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/syukaijo-3.html

http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/syukaijo-4.html

[22] 元々のデータ数は 78,455 であったが，この中から「屋内」の記載のなかったものとバス車内で測定されたものを除外した。